

Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича
Российская Академия наук



Сборник трудов
46-й междисциплинарной
школы-конференции ИППИ РАН

Информационные технологии и системы

Огниково, 2-6 октября 2022

Москва

2022

ИТиС 2022: Сборник трудов 46-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН "Информационные технологии и системы 2022". — Москва: Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, 2022. — 734 с.

Содержание

- 1 Поиск геномных маркеров холодоустойчивости на примере комара-звонца *Diamesa permasca* – обитателя холодных водотоков**
Дрозд Я.Г., Пржиборо А.А., Гоголева Н.Е., Шагимарданова Е.И., Гусев О.А., Шайхутдинов Н.М., Гельфанд М.С. **11**
- 2 Паттерны размеров множественных репликонов у бактерий**
Драненко Н.О., Родина А.Д., Деменчук Я.В., Гельфанд М.С., Бочкарёва О.О. **19**
- 3 Отличия в трехмерной структуре хроматина между нейрональными и глиальными клетками**
Плетенев И.А., Базаревич М.В., Черкасов А.В., Ефимова О.И., Кононкова А.Д., Загирова Д.Р., Храмеева Е.Е. **22**
- 4 Анализ множественно картированных прочтений в Red-C эксперименте.**
Бердникович Е.А., Жарикова А.А., Миронов А.А. **23**
- 5 Взаимодействие когезина и CTCF в *Drosophila melanogaster***
Галицына А.А. **27**
- 6 База данных RNA-Chrom открывает новые возможности для анализа РНК-хроматинового интерактома**
Рябых Г.К., Сигорских А.И., Коростелев Ю.Д., Жарикова А.А., Миронов А.А. **33**
- 7 Динамика dN/dS на малых эволюционных расстояниях**
Белоусова Е.А., Столярова А.В., Кондрашов А.С., Базыкин Г.А. **35**
- 8 Поиск гетеродуплексов в данных взаимодействия РНК с хроматином**
Рябых Г.К., Миронов А.А. **43**
- 9 Анализ роли локальной вторичной структурированности у некодирующих РНК в их формировании РНК-хроматинового интерактома**
Богомаз О. Д., Рябых Г. К., Миронов А. А. **44**
- 10 Сравнительный анализ данных РНК-белковых и РНК-хроматиновых взаимодействий на примере данных fRIP-Seq**
Хлебников Д.А., Миронов А.А. **46**
- 11 On elongated chromatin loops charaterized by transcriptional differences in *D. discoideum***

- Жегалова И.В., Ульянов С.В., Галицына А.А., Храмева Е.Е., Гельфанд М.С. 48
- 12 Ассоциация редких вариантов с фенотипом некомпактного миокарда левого желудочка в российской популяции**
Зайченко М., Раменский В.Е., Жарикова А.А., Вяткин Ю.В., Киселева А.В., Ершова А.И., Сотникова Е.А., Дивашук М.Г., Курилова О.В., Скирко О.П., Муромцева Г.А., Белова О.А., Рачкова С.А., Покровская М.С., Шальнова С.А., Куликова О.В., Мясников Р.П., Драпкина О.М., Мешков А.Н. 52
- 13 Модель песочных часов в полном превращении насекомых**
Озерова А.М., Гельфанд М.С. 62
- 14 Зависимость частоты эктопической геномной конверсии от взаимного расположения паралогов в мейотическом хроматине**
Вахрушева О.А., Базыкин Г.А. 63
- 15 Консервативность неконсенсусных нуклеотидов в сайтах связывания факторов транскрипции**
Белюсова Е. А., Моран-Товар Р., Лэссиг М., Гельфанд М. С. 65
- 16 Нейрофиброматоз II типа: трудности дифференциальной диагностики и молекулярно-генетические предикторы течения заболевания**
Макашова Е.С., Карандашева К.О., Галкин М.В., Золотова С.В., Голанов А.В. 74
- 17 Изучение роли структуры хроматина в промотор-энхансерных взаимодействиях у млекопитающих**
Первошикова К.Ю, Галицына А.А., Гельфанд М.С. 80
- 18 Генетические нарушения у пациентов с легочной артериальной гипертензией**
Охрименко Г., Малько Д., Осипова Н., Федоров А., Барышев П., Данковцева Е., Затейщиков Д., Бровкина О., Попцова М. 93
- 19 Поиск и изучение полу-экстрагируемых РНК**
Валяева А.А., Жарикова А.А., Шеваль Е.В., Миронов А.А. 98
- 20 Внутригенная компенсация и глубокое мутационное сканирование**
Азбукина Н.В., Жарикова А.А., Раменский В.Е. 100
- 21 Особенности эволюции С-концевого домена белков нуклеоплазминового семейства**
Вяльцев В.В., Ильницкий И.С., Жарикова А.А., Миронов А.А. 105

22 Сравнительный анализ данных экспериментов Red-C и Hi-C	
Звездин Д.С., Жарикова А.А., Миронов А.А.	108
23 Активность нейронов гиппокампа в периоды центрального апноэ у кошек	
Лиманская Александра, Левичкина Екатерина, Пигарев Иван	112
24 Новый интерфейс поиска для НКРЯ: системное описание и реализация	
Гладилин С., Козеренко А.Д.	113
25 Разработка формата разметки и принципов аннотирования для семантического корпуса русского языка на материале «Маленького принца»	
Фролова Т.И., Рыгаев И.П.	122
26 Хранение разных типов метафор в ментальном лексиконе на примере русских глаголов	
Орлов А. В., Конча К. О., Апресян В. Ю.	137
27 О простоте: сравнение форматов временной разметки TimeML и tgt-temp	
Тимошенко С. П.	146
28 От безусловных оборотов к микросинтаксису	
Чага А.В.	158
29 Обзор методов оценки сложности текстов в сфере регулирования банковской деятельности	
Морковкин А.Г., Ильвовский Д.А.	163
30 О методах сжатия гиперспектральных видеопоследовательностей снятых акустооптическим спектрофотометром	
Погадаев А., Ершов Е.	173
31 Подбор оптимального фильтра для заданного малоканального сенсора в задаче оптической сортировки картофеля	
Карасев О. А., Ершов Е. И., Лысенко М. В.	181
32 Метод оценки расстояния Васерштейна с помощью быстрого преобразования Хафа	
Шутова А.А., Ершов Е.И.	188
33 Исследование коннектомов с помощью вычисления кривизны графов	
Першина А.А., Левченко Е.С., Чернышев В.Л.	195

- 34 Предобучение без учителя для задачи сегментации анатомических структур на КТ-изображениях**
Гончаров М.Ю., Кулешов И.А., Соболева В.В., Соболева Е.А. **201**
- 35 Алгоритмы мета-обучения Reptile и MAML в классификации данных ЭЭГ**
Бердышев Д.А., Козырский Б.Л. **208**
- 36 Непараметрическая регрессия с возможностью отказа от предсказания**
Алексеев А.В., Носков Ф.А., Панов М.Е. **215**
- 37 Алгоритм оценки распределения параметров освещения в сцене по её изображению**
Тесалин В.В., Ершов Е.И. **227**
- 38 Распознавание индивидуальных митохондрий и анализ их характеристик с помощью методов компьютерного зрения**
Макиевская К.И., Попков В.А., Андрианова Н.В., Плотников Е.Ю. **246**
- 39 Предсказание следующей активности в журналах событий: подход, основанный на LSTM-сетях и градиентном бустинге**
Карпов М.Е., Устюжанин А.Е., Стрельцов А.Д., Петрович С.Д. **251**
- 40 Компенсация цветной дымки на данных дистанционного зондирования Земли для RGB изображений**
Селюгин М.А., Бочаров Д.А. **263**
- 41 Экспериментальное исследование качества компенсации теней от облаков на мультиспектральных данных спутников Sentinel-2 и Landsat 8**
Павлова М.А., Бочаров Д.А. **276**
- 42 Использование плотного стереосопоставления и эффекта цветового виньетирования для улучшения качества преобразования цветовых координат**
Шепелев Л.В., Чумаченко А.С., Ермаков И.А., Шепелев Д.А. **286**
- 43 Исследование задачи цветовой константности для мультиспектрального случая с использованием априорной информации о свойствах отражения поверхности**
Кущев Д.О., Бочаров Д.А., Сидорчук Д.С. **294**
- 44 О методах восстановления гиперспектральных изображений по трёхканальным с нулевой цветовой ошибкой**
Владимиров Д. М., Ершов Е. И., Реутский Д. А. **303**

45 Сравнение известных методов спектрального переноса Нурмухаметов А.Л., Сидорчук Д.С.	309
46 Нормализация изображения лабораторного планшета с лунками для дальнейшего распознавания Шарапов Д.А., Корчагин С.А., Ершов Е.И.	317
47 Методы определения реакции агглютинации на планшетах с круглыми лунками Корчагин С. А., Ершов Е. И.	325
48 Детекция лунок на планшетах, предназначенных для определения группы крови Зайченкова Е., Корчагин С., Ершов Е.	334
49 Автоматический скоринг кальцинации коронарных артерий с использованием мультиклассовой сегментации Ломакин Ф.В., Самохин В.Ю.	346
50 Обучение алгоритма оценки освещения для произвольного сенсора на основе гиперспектральных изображений с оценкой Паншин А.В, Тесалин В.В., Ершов Е.И, Шепелев Д.А.	354
51 Оценка качества статических алгоритмов оценки спектра освещения по гиперспектральным изображениям Ярчук Д.Р., Тесалин В.В., Ершов Е.И.	361
52 Поиск спектральных фильтров для улучшения восстановления гиперспектральных изображений Реутский Д. А., Ершов Егор	370
53 Определение оптимальных спектральных чувствительностей мультиканального сенсора в задаче оптической сортировки картофеля Ермаков И.А., Ершов Е.И.	378
54 Исследование влияния ошибок оценки канала на настройку реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей в системах ММО Пойда А.И., Ендовицкий Е.О., Куреев А.А.	386
55 Оценка распределения задержки при использовании периодического окна ограниченного доступа в случае коротких слотов Зажигина Е.А., Юсупов Р.Р.	400

56	Исследование влияния отклонения размеров патч-антенны на характеристики реконфигурируемой интеллектуальной поверхности	
	Тярин А.С., Куреев А.А.	415
57	Экспериментальное исследование механизма интервала тишины в устройствах Wi-Fi	
	Баранников А. В., Левицкий И. А.	422
58	Анализ эффективности прямых соединений во вторичном канале при обслуживании VR-трафика в сетях Wi-Fi	
	Мирзоян М.А., Корнеев Е.С, Логинов В.А.	434
59	Прототип облачного классификатора трафика для повышения качества обслуживания	
	Курапов А.А., Шамсимухаметов Д.Р., Любогощев М.В	444
60	Исследование метода разрешения коллизий в сценариях сосуществования двух операторов NR-U в нескольких нелицензируемых каналах	
	Троегубов А.Ю., Логинов В.А.	455
61	Классификация зашифрованного с помощью протокола QUIC трафика с модификацией ESNI	
	Борисов И.С., Курапов А.А., Шамсимухаметов Д.Р.	466
62	Сравнительный анализ LDPC декодеров с неравной степенью квантования для разных типов сообщений	
	Воробьев Д.И., Гаев В.А.	482
63	Построение и исследование грубоквантованного послоевого декодера с помощью информационного подхода	
	Курилов О. Ю., Гаев В. А.	488
64	Исследование алгоритмов предсказания MIMO-канала в расширенных сценариях высокой мобильности	
	Глинский К.А., Куреев А.А., Красилов А.Н.	496
65	Анализ эффективности использования методов доступа к каналу с прослушиванием несущей в сетях NB-Fi	
	Павлова И.Д., Банков Д.В., Ляхов А.И., Хоров Е.М.	508
66	Разработка и исследование методов координированных передач Wi-Fi 7	
	Гайнуллин И.И., Кротов А.В.	520

67 Сравнительный анализ LPWAN-технологий: Sigfox, LoRaWAN, NB-Fi	
Левченко П.А., Банков Д.В., Хоров Е.М., Ляхов А.И.	534
68 Исследование алгоритмов выбора сигнально-кодовой конструкции при многоадресной передаче в сетях 5G	
Лебедева И.В., Юсупов Р.Р., Красилов А.Н.	551
69 Уменьшение сложности моделирования сверхнизкого уровня ошибок МПП-кодов	
Угловский А.Ю., Алексеев И.А., Шукин В.Ю., Куреев А.А.	562
70 Математическая модель периодического окна ограниченного доступа со слотами произвольной длительности	
Шлапак М.В., Юсупов Р.Р., Ляхов А.И.	573
71 Распределение радиоресурсов при использовании методов NOMA и OFDMA в нисходящем канале в сетях Wi-Fi	
Тутельян С.А., Хоров Е.М.	590
72 Об эффективности стратегий группировки пользователей для обслуживания URLLC-трафика в восходящем канале	
Шамсутдинов А.М., Шашин А.Э., Красилов А.Н.	603
73 Выбор параметров обслуживания URLLC-трафика в восходящем канале в сценарии высокой мобильности пользователей	
Шашин А.Э., Красилов А.Н.	616
74 Исследование алгоритмов балансировки AR/VR-трафика в сетях 5G с функцией множественного подключения	
Суслопаров М.В., Красилов А.Н., Хоров Е.М.	629
75 Исследование метода снижения размерности задачи настройки реконфигурируемой интеллектуальной поверхности	
Буртаков И.А., Куреев А.А.	647
76 Исследование методов дискретизации непрерывного решения задачи настройки реконфигурируемой интеллектуальной поверхности	
Козловский Н.В., Буртаков И.А., Куреев А.А.	659
77 Аналитическая модель метода распределенного доступа к каналу в сетях 5G V2X	
Отмахов А.Д., Красилов А.Н., Банков Д.В.	671

- 78 Экспериментальная оценка эффективности использования неортогонального множественного доступа в восходящем канале в сетях Wi-Fi**
Злобин Р.А., Куреев А.А. **687**
- 79 Уменьшение сложности декодера МПП кодов с параллельным расписанием построенных на базе Information Bottleneck**
Мельников И.А., Крещук А.А., Куреев А.А. **700**
- 80 Улучшенный метод предварительного доступа к каналу для обслуживания трафика реального времени в сетях Wi-Fi**
Чемров К.С., Банков Д.В., Хоров Е.М., Ляхов А.И. **708**
- 81 Исследование планировщиков MU-MIMO для веб- и видеотрафика в сетях Wi-Fi**
Логинов В.А., Старцев И.А., Тутьельян С.А., Хоров Е.М. **724**

Поиск геномных маркеров холодоустойчивости на примере комара-звонца *Diamesa permacra* (Walker, 1856) (Diptera: Chironomidae) – обитателя холодных водотоков

Яна Г. Дрозд¹, Андрей А. Пржиборо², Наталья Е. Гоголева³, Елена И. Шагимарданова³, Олег А. Гусев³, Нурислам М. Шайхутдинов^{3,4}, Михаил С. Гельфанд^{4,5}

¹ Факультет биоинженерии и биоинформатики, МГУ им.М.В. Ломоносова

² Springer Heidelberg, Tiergartenstr. 17, 69121 Heidelberg, Germany

³ Научный центр регуляторной геномики, Институт фундаментальной медицины и биологии, Казанский федеральный университет, 420012, Казань

⁴ Сколковский институт науки и технологий, 121205, Москва

⁵ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, 127051, Москва

drozd.janin@gmail.com

Аннотация. Исследование геномных адаптаций на примере немодельных организмов, обитающих в экстремальных условиях, позволяет определить, как происходит изменение одних и тех же генетических систем под влиянием разных факторов окружающей среды. В данной работе мы исследовали умеренно криофильный вид комаров-звонцов *Diamesa permacra* (Walker, 1856) (Diptera: Chironomidae: Diamesinae), личинки которого стенотермны и обитают в холодных родниках и ручьях.

Представители рода *Diamesa* являются хорошей моделью для изучения генетических маркеров холодоустойчивости, регуляции экспрессии генов теплового шока (hsp) и гемоглобинов (Hb), липидного состава мембран клеток, белков-антифризов, а также термостабильности белков. В рамках нашего исследования была получена de novo сборка ядерного генома *D. permacra* и выполнено полногеномное предсказание белок-кодирующих генов. В том числе, были предсказаны гены, которые могут быть связаны с адаптацией к низким температурам.

Полученная геномная сборка и геномная аннотация позволят изучить регуляцию экспрессии различных генных семейств, среди которых наибольший интерес представляют гены теплового шока (Hsp) и гемоглобины (Hb), регуляция экспрессии которых и эволюционная история недостаточно изучена.

Ключевые слова: Холодоустойчивость, реофилы, криофилы, адаптация, сборка генома, транскриптом, хирономиды, нанопоровое секвенирование

Введение

Адаптация к жизни в условиях низких температур может осуществляться разными способами. Можно выделить две основных стратегии адаптации к низким температурам: устойчивость к переохлаждению, когда насекомое при низких температурах может препятствовать собственному замерзанию, и морозостойкость, или способность переносить замораживание тела [1, 2].

К основным механизмам, используемым видами, препятствующими собственному замерзанию, относится увеличение пластичности структуры психрофильных ферментов путем уменьшения количества водородных связей [3,4], изменения в структуре липидного слоя мембраны [5], синтез белков-антифризов, гликопротеинов [1], а также синтез криопротекторов, преимущественно низкомолекулярных (полиолы, сахара и аминокислоты) [6]. У некоторых видов также наблюдается наличие индуцируемых холодом промоторов [7]. Виды морозоустойчивые, напротив, не препятствуют кристаллизации воды в своем организме, а могут существовать в таком состоянии, используя для этого криопротекторные и криозащитные белки [8]. Криопротекторы препятствуют росту внутриклеточных кристаллов льда, в то время как и криозащитные белки препятствуют повреждению тканей и внутриклеточных структур при понижении температуры [1,9].

В данной работе мы исследовали умеренно криофильный вид комаров-звонцов *Diamesa permacra* (Walker, 1856) (Diptera: Chironomidae). Этот вид (рис. 1а, б) – типичный представитель подсемейства *Diamesinae*. Подсемейство включает 22 рода (Ashe & O'Connog, 2009) и более 220 видов, личинки подавляющего большинства из которых обитают только в холодных или быстро текущих водотоках и являются холодолюбивыми стенотермами и оксифилами. Личинки *Diamesinae* – массовые обитатели горных рек и ручьев, родников и других холодных водотоков. Взрослые комары у многих представителей этого подсемейства появляются в холодное время года. *Diamesa permacra* принадлежит к группе видов *D. dampfi*; это бореально-субальпийский вид, распространенный в странах Европы (Ashe & O'Connog, 2009; Пржиборо, 2018). Личинки *D. permacra* стенотермны (Rossaro, 1991); они развиваются в холодных родниках и ручьях, питаются водорослями и детритом (Dittmar, 1955; Lindegaard, 1995; Moller Pillot, 2013; Пржиборо, 2018; и др.). Личинки изучаемой популяции обитают в верховье родниковой реки на западе Ленинградской области (рис. 1в) при стабильной температуре воды 5-10°C в течение всего года (Przhiboro, 2009; Пржиборо, 2018). Ранее, эта же популяция *D. permacra* была рассмотрена в рамках сравнительного исследования экспрессии генов теплового шока *hsp70* (Zatsepina et al., 2016). При этом было показано, что у данного вида наблюдается стабильно высокий уровень *Hsp70* и отсутствует индукция *hsp70* при тепловом шоке (вероятно, она утеряна из-за обитания при стабильной температуре). Представители рода *Diamesa* имеют широкий диапазон термотолерантности: этот род включает как стенотермные криофильные, так и более эвритермные виды. Таким образом, молекулярно-биологическая характеристика холодолюбивого вида позволит лучше понять механизмы столь широкой экологической вариабельности комаров-звонцов, которые представлены разнообразными экологическими группами. В числе данных групп, наиболее

интересными представляются экстремофильные комары-звонцы - уже описанные выше криофилы, ацидофилы, термотолерантные виды, галофилы, а также виды устойчивые к высушиванию, и крайней форме адаптации к потере воды - ангидробиозу. *Diamesa permasca* может служить отличным сравнительным объектом, наряду с другим экстремальным криофильным видом *Belgica antarctica* (Jacobs, 1900) (Diptera: Chironomidae: Orthoclaadiinae). На данный момент геномные механизмы адаптаций к низким температурам рода *Diamesa* слабо изучены из-за отсутствия геномных данных.

Таким образом, главной задачей данной работы является исследование механизмов приспособления вида к низким температурам местообитания на личиночной стадии на основании данных NGS секвенирования.

Сборка генома

Высококачественная сборка генома до прехромосомного уровня позволяет достоверно определить весь спектр таргетных генов и их регуляторные участки. Это очень важно для объективной оценки уровня экспрессии генов и их регуляции. Например, у комаров-звонцов в геноме может присутствовать более 10 копий гемоглобинов и чтобы правильно оценить работу этих генов, необходимо иметь качественно собранный геном. В данной работе была выполнена гибридная сборка генома *D. permasca* de novo с помощью *NanSeq v.08a1* [10] на основе длинных прочтений, полученных с помощью секвенирующей платформы Mk1C (Oxford Nanopore Technologies) и коротких прочтений, полученных с помощью секвенирующей платформы HiSeq 2500 (Illumina). биоинформатический пайплайн по сборке и оценке генома представлен на рисунке 2. По распределению k-меров предварительный размер генома составил 85.8Mb - 86.6Mb (Рис. 3), конечный размер собранного генома с помощью программы *NanSeq* и дополнительного полишинга иллюминиевскими ридами, осуществленного с помощью программы *Pilon v.1.23* [11] составил 92.7Mb. Размер генома *D. permasca* на текущий момент является одним из наименьших среди всех видов семейства комаров-звонцов [12].

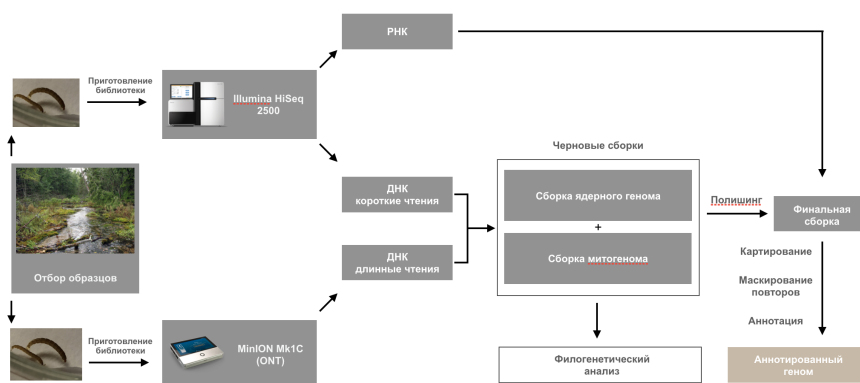


Рис. 2. Пайплайн сборки и анализа генома

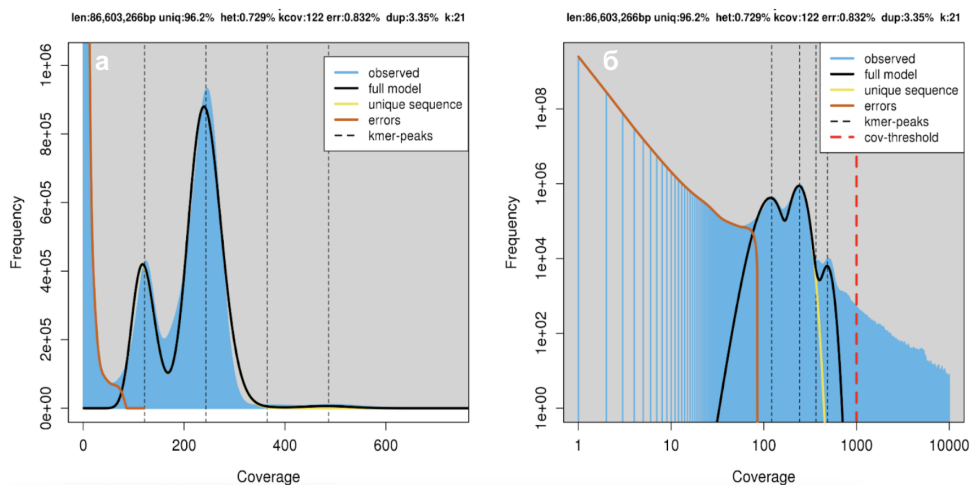


Рис. 3. а - предсказание размера генома, числа уникальных k-меров и уровня гетерозиготности: по оси X представлены размеры k-меров, по оси Y - число уникальных k-меров, б - соответствие модели genomescore наблюдаемой частоте встречаемости k-меров.

Для оценки качества сборки было использовано программное обеспечение Quast (версия 5.2.0) (таблица 1) [13], для определения полноты сборки было использовано программное обеспечение BUSCO 5.3.2 [14] (таблица 1).

Таблица 1. Основные характеристики сборки

*С - completed (завершенные) гены, S - single-copy (в единичной копии), D - duplicated (дублицированные), F - fragmented (фрагментированные), M - missing (ненайденные).

Общее количество контигов	168
Контиги длиной ≥ 1000 bp	155
Контиги длиной ≥ 5000 bp	112
Контиги длиной ≥ 10000 bp	95
Контиги длиной ≥ 25000 bp	82
Контиги длиной ≥ 50000 bp	75
Наибольший контиг, bp	5811341
Общая длина сборки, bp	92766986
Покрытие Illumina	300
Покрытие ONT	50
ГЦ состав (%)	26.95
N50	2272732
N75	1141309

L50	13
L75	27
N на 100kbp	0.00
Оценка полноты BUSCO в режиме "геном" до полишинга	C:94.0%[S:93.3%,D:0.7%],F:1.0%,M:5.0%,n:3285*
Оценка полноты BUSCO в режиме "геном" после полишинга	C:95.2%[S:94.3%,D:0.9%],F:0.5%,M:4.3%,n:3285*
Оценка полноты BUSCO в режиме "протеом"	C:94.9%[S:84.3%,D:10.6%],F:0.8%,M:4.3%,n:3285
Количество белок-кодирующих генов	15257

Филогенетический анализ *D. пергаста* на основе данных COX1

Для сборки митохондриального генома использовались предварительно отфильтрованные чтения Illumina, оставшиеся несопоставленными после процедуры картирования всех чтений на получившийся ядерный геном. Таксономическая принадлежность вида была проверена по последовательности цитохромоксидазы-1, найденной с помощью сборки и аннотирования митохондриальных контигов исследуемого вида с использованием SPAdes v3.1.13, MitoBim, MitoZ, MitoS2.

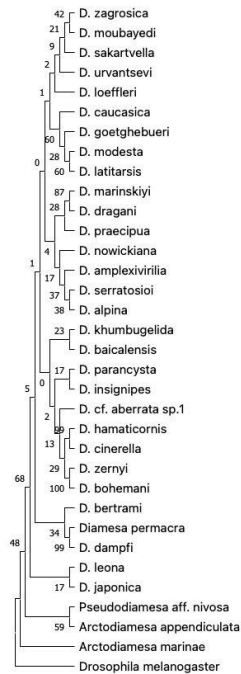


Рис. 4. Филогенетическое дерево по последовательности гена цитохромоксидазы-1 (COX1) представителей диамес и некоторых других представителей отряда Diptera (*Arctodiamesa*, *Pseudodiamesa*, *Drosophila*). Выравнивание - алгоритм MUSCLE, построение дерева - алгоритм максимального правдоподобия в MEGAX, bootstrap 500).

Полученные на данном этапе результаты являются предварительными, однако они необходимы для дальнейшего развития проекта по изучению механизмов *D. пергаста* к условиям жизни при низких температурах: поиска участков генома, задействованных в адаптации, анализа транскриптома и изменения экспрессии белков *D. пергаста* при изменениях температуры, а также моделирование и изучение структуры белков у нескольких видов рода *Diamesa*, обитающих в различных температурных условиях, для сравнения термопластичности этих видов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 20-44-07002 и за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030). Работа А.А. Пржиборо выполнена в рамках Гостемы 122031100274-7 (Зоологический институт РАН).

Литература

1. Storey KB, Storey JM. Insect cold hardiness: metabolic, gene, and protein adaptation | This review is part of a virtual symposium on recent advances in understanding a variety of complex regulatory processes in insect physiology and endocrinology, including development, metabolism, cold hardiness, food intake and digestion, and diuresis, through the use of omics technologies in the postgenomic era. *Canadian Journal of Zoology*. 2012. pp. 456–475. doi:10.1139/z2012-011
2. Lencioni V, Jousson O, Guella G, Bernabò P. Cold adaptive potential of chironomids overwintering in a glacial stream. *Physiol Entomol*. 2015;40: 43–53.
3. Paredes DI, Watters K, Pitman DJ, Bystroff C, Dordick JS. Comparative void-volume analysis of psychrophilic and mesophilic enzymes: Structural bioinformatics of psychrophilic enzymes reveals sources of core flexibility. *BMC Struct Biol*. 2011;11: 42.
4. Gault S, Higgins PM, Cockell CS, Gillies K. A meta-analysis of the activity, stability, and mutational characteristics of temperature-adapted enzymes. *Biosci Rep*. 2021;41. doi:10.1042/BSR20210336
5. Trenti F, Sandron T, Guella G, Lencioni V. Insect cold-tolerance and lipidome: Membrane lipid composition of two chironomid species differently adapted to cold. *Cryobiology*. 2022;106: 84–90.
6. Duman JG. Antifreeze and ice nucleator proteins in terrestrial arthropods. *Annu Rev Physiol*. 2001;63: 327–357.
7. Michaud MR, Denlinger DL. Molecular modalities of insect cold survival: current understanding and future trends. *Int Congr Ser*. 2004;1275: 32–46.
8. Strathdee AT, Bale JS. Life on the edge: insect ecology in arctic environments. *Annu Rev Entomol*. 1998;43: 85–106.
9. Kristiansen E, Ramløv H, Højrup P, Pedersen SA, Hagen L, Zachariassen KE. Structural characteristics of a novel antifreeze protein from the longhorn beetle *Rhagium inquisitor*. *Insect Biochem Mol Biol*. 2011;41: 109–117.
10. Haghshenas E, Asghari H, Stoye J, Chauve C, Hach F. HASLR: Fast Hybrid Assembly of Long Reads. *iScience*. 2020;23: 101389.

11. Walker BJ, Abeel T, Shea T, Priest M, Abouelliel A, Sakthikumar S, et al. Pilon: an integrated tool for comprehensive microbial variant detection and genome assembly improvement. *PLoS One*. 2014;9: e112963.
12. Cornette R, Gusev O, Nakahara Y, Shimura S, Kikawada T, Okuda T. Chironomid midges (Diptera, chironomidae) show extremely small genome sizes. *Zoolog Sci*. 2015;32: 248–254.
13. Gurevich A, Saveliev V, Vyahhi N, Tesler G. QUASt: quality assessment tool for genome assemblies. *Bioinformatics*. 2013;29: 1072–1075.
14. Simão FA, Waterhouse RM, Ioannidis P, Kriventseva EV, Zdobnov EM. BUSCO: assessing genome assembly and annotation completeness with single-copy orthologs. *Bioinformatics*. 2015;31: 3210–3212.
15. Пржиборо АА. 2018. Диамеза тощая *Diamesa permacra* (Walker, 1856). Красная книга Ленинградской области. Животные. С.-Петербург: Папирус. с. 85-86.
16. Ashe P. & O'Connor JP. 2009. A World catalogue of Chironomidae (Diptera). Part 1. Buchonomyiinae, Chilenomyiinae, Podonominae, Aphroteniinae, Tanypodinae, Usambaromyiinae, Diamesinae, Prodiamesinae and Telmatogetoninae. Dublin: Irish Biogeographical Society. 445 p.
17. Dittmar H. 1955. Ein Sauerlandbach. Untersuchungen an einem Wiesen-Mittelgebirgsbach. *Archiv für Hydrobiologie*, 50: 305–552.
18. Lindegaard C. 1995. Chironomidae (Diptera) of European cold springs and factors influencing their distribution. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 68, Supplement: 108–131.
19. Moller Pillot HKM. 2013. Chironomidae larvae III – biology and ecology of the aquatic Orthoclaadiinae. Zeist: KNNV Publishing. 312 p.
20. Przhiboro AA. 2009. Two new records of Tipuloidea (Diptera) from a cold spring in NW Russia. *Zoosymposia*, 3: 239-243. <https://doi.org/10.11646/zoosymposia.3.1.19>
21. Rossaro B. 1991. Chironomids and water temperature. *Aquatic Insects*, 13: 87-98.
22. Zatssepina OG, Przhiboro AA, Yushenova IA, Shilova V, Zelentsova ES, Shostak NG, Evgen'ev MB & Garbuz DG. 2016. A *Drosophila* heat shock response represents an exception rather than a rule amongst Diptera species. *Insect Molecular Biology*, 25(4): 431-449. <https://doi.org/10.1111/imb.12235>

Patterns of multiple replicons' sizes in bacteria

Natalia O. Dranenko¹, Aleksandra Rodina², Yaroslav Demenchuk³, Mikhail S. Gelfand^{1,4}, Olga O. Bochkareva⁵

¹A.A. Kharkevich Institute for Information Transmission Problems, 127051, Moscow, Russia

²Immanuel Kant Baltic Federal University, 236041, Kaliningrad, Russia

³National Research University Higher School of Economics, 101000, Moscow, Russia

⁴Skolkovo Institute of Science and Technology, 121205, Moscow, Russia

⁵Institute of Science and Technology, 3400, Klosterneuburg, Austria

dranenko@phystech.edu

Abstract. Bacterial genome size varies from 100 kb in obligate parasites to over 15 Mb in free-living species. Most of bacteria have a single chromosome that may be supplemented by a few smaller, dispensable plasmids. However, to date, approximately 10% of the bacteria with completely sequenced genome have more than one stable large replicon. Some of them are species-specific, carrying pathogenicity or symbiotic factors. Others are present on genus level and may carry even house-keeping genes. Meanwhile, the evolutionary relationships between the replicons have not been described yet.

In this work, we analyzed replicons' sizes in genomes of different species in the context of species evolution. In four bacterial genera (*Burkholderia*, *Cupriavidus*, *Vibrio*, and *Pseudoalteromonas*) we detected strong positive correlation between chromosome and chromid sizes. In other bacteria, chromid/plasmid shows stable size ~0.5 Mb. Our results shed light on the factors under formation of multipartite genomes in the bacterial world.

Keywords: Bacteria, Chromosome size, Chromid, Evolution.

1 Introduction

For many years, there was a consensus idea that the bacterial genome consists of a single circular chromosome that may be supplemented by small nonessential circular plasmids. Since 1979, when linear plasmids in *Streptomyces* were discovered [1], these views have undergone changes. Ten years later the presence of two chromosomes in *Rhodobacter* genome were discovered [2]. This type of genome organization is called multipartite genome [3]. To date, about 10% of the sequenced bacterial species differ in composition from the model organism *E. coli*, which contains one large circular chromosome and several small circular plasmids [3].

When the bacterial genome is divided into several large elements, the largest one, that holds the main fraction of house-keeping genes, is accepted to be considered a primary chromosome. The others can be classified as chromids, megaplasmids or plasmids based on their size and gene composition [for details, see notation in 3], but

there are no strong definitions and this classification is mostly based on thresholds [4, 5, 6, 7, 3].

Bacterial genome size varies from ~100 kb for parasites [8] to ~15 Mb for free-living organisms [9]. Indeed, multipartite genomes are on average larger, however, there are also large single chromosome genomes and only one third of the genomes with a size >6Mb are multipartite. Therefore, genome size is not uniquely driven by multiparticity. Another hypothesis suggests that secondary replicons are expected to be under less selective pressure and have more hotspots of the new HT genes [10]. In this context, secondary replicons may act as «test beds» that accumulate new genes and allow them to evolve more rapidly.

2 Results

In this work we analysed different aspect of bacterial genomes composition. First step of our analysis was dedicated to the analysis of the total length of the genome. The size of the genome is associated with the lifestyle of a bacterium, while more than one large component of the genome can be in a bacterium of any lifestyle. No association was found between taxon and genome size.

Secondly, we checked which bacterial species have large secondary replicons. To determine the threshold for the size of the replicon, we analyzed the size of secondary replicons found within the species. For all genomes with large secondary replicons in the dataset, we analysed relationships between first (chromosome), second (chromid/megaplasmid) and third replicon (if available). As a criterion for outliers, we used one and a half interquartile intervals according to the size of each individual replicon.

For each pair of replicon sizes, we calculated the correlation coefficients between their sizes. By this procedure, we identified three patterns of relationships between sizes of first and second replicons. The initial data can be separated into three groups: with positive correlation between first and second replicon, with the constant size of one of the replicons and with negative correlation between first and second replicons sizes. The explanation of the inverse correlation between the sizes of replicons can be a translocation or a series of translocations between replicons while preserving the overall size of the genome.

3 Acknowledgements

This work started at the School of Molecular and Theoretical Biology 2021.

References

1. HAYAKAWA, T., TANAKA, T., SAKAGUCHI, K., OTAKE, N. and YONEHARA, H: A LINEAR PLASMID-LIKE DNA IN STREPTOMYCES SP. PRODUCING

- LANKACIDIN GROUP ANTIBIOTICS. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 25(4), pp.255-260 (1979).
2. Suwanto, A., Kaplan, S.: Physical and genetic mapping of the *Rhodobacter sphaeroides* 2.4.1 genome: presence of two unique circular chromosomes. *Journal of Bacteriology*, 171(11), pp.5850-5859 (1989)
 3. diCenzo, G., Finan, T.: The Divided Bacterial Genome: Structure, Function, and Evolution. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 81(3) (2017)
 4. Burton, J., Wescombe, P., McClain, J., Chai, M., MacDonald, K., Hale, J., Tagg, J., Reid, G., Gloor, G., Cadieux, P.: Persistence of the Oral Probiotic *Streptococcus salivarius* M18 Is Dose Dependent and Megaplasmid Transfer Can Augment Their Bacteriocin Production and Adhesion Characteristics. *PLoS ONE*, 8(6), p.e65991 (2013)
 5. Weiser, R., Green, A., Bull, M., Cunningham-Oakes, E., Jolley, K., Maiden, M., Hall, A., Winstanley, C., Weightman, A., Donoghue, D., Amezquita, A., Connor, T., Mahenthiralingam, E.: Not all *Pseudomonas aeruginosa* are equal: strains from industrial sources possess uniquely large multireplicon genomes. *Microbial Genomics*, 5(7). (2019)
 6. Cezares, A., Moore, M., Hall, J., Wright, L., Grimes, M., Emond-Renault, J., Pongchaikul, P., Santanirand, P., Levesque, R., Fothergill, J., Winstanley, C.: A megaplasmid family driving dissemination of multidrug resistance in *Pseudomonas*. *Nature Communications*, 11(1) (2020)
 7. Bottacini, F., O'Connell Motherway, M., Casey, E., McDonnell, B., Mahony, J., Ventura, M., van Sinderen, D.: Discovery of a Conjugative Megaplasmid in *Bifidobacterium breve*. *Applied and Environmental Microbiology*, 81(1), pp.166-176 (2015)
 8. Bennett, G., Moran, N.: Small, Smaller, Smallest: The Origins and Evolution of Ancient Dual Symbiosis in a Phloem-Feeding Insect. *Genome Biology and Evolution*, 5(9), pp.1675-1688 (2013)
 9. Han, K., Li, Z., Peng, R., Zhu, L., Zhou, T., Wang, L., Li, S., Zhang, X., Hu, W., Wu, Z., Qin, N., Li, Y.: Extraordinary expansion of a *Sorangium cellulosum* genome from an alkaline milieu. *Scientific Reports*, 3(1) (2013)
 10. diCenzo, G., Mengoni, A., Perrin, E.: Chromids Aid Genome Expansion and Functional Diversification in the Family Burkholderiaceae. *Molecular Biology and Evolution*, 36(3), pp.562-574, (2019)

Отличия в трехмерной структуре хроматина между нейрональными и глиальными клетками

Илья Плетенев¹, Мария Базаревич^{1,2}, Александр Черкасов¹, Ольга Ефимова¹, Анна Кононкова¹, Диана Загирова¹, и Екатерина Храмеева¹

¹ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия,
ilya.pletenev@skoltech.ru

² МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация Трехмерная структура хроматина изменяется в процессе дифференцировки клеток [1],[2], однако связь этих изменений с клеточной специализацией малопонятна. В данной работе мы провели сравнение трехмерной структуры хроматина в нейрональных и глиальных клетках. Анализ показал глобальные изменения хроматина на всех уровнях структурной организации. В нейрональных клетках преобладают близкие контакты (< 4 млн п.о.) и более выражены такие хроматиновые структуры, как топологически ассоциированные домены (ТАДы) и петли хроматина. Напротив, в клетках глиии обогащены дальние (> 4 млн п.о.) и межхромосомные взаимодействия, а также более выражена компарментализация хромосомом на активные и неактивные регионы. Вышеперечисленные отличия коррелируют с изменениями в транскрипции между нейрональными и глиальными генами, позволяя предположить важную роль трехмерной конформации хроматина в определении клеточной судьбы.

Ключевые слова: хроматин, транскрипция, нейроны, глия

1 Благодарности

Мы благодарим Николая Кондратьева, Анну Морозову и Георгия Костюка из ПКБ № 1 им. Н.А. Алексеева. Работа поддержана грантом РНФ №21-74-10102.

Список литературы

1. Dixon, J., Jung, I., Selvaraj, S. et al. Chromatin architecture reorganization during stem cell differentiation. *Nature* 518, 331–336 (2015).
2. Bonev B, Mendelson Cohen N, Szabo Q, Fritsch L, Papadopoulos GL, Lubling Y, Xu X, Lv X, Hugnot JP, Tanay A, Cavalli G. Multiscale 3D Genome Rewiring during Mouse Neural Development. *Cell*. 171(3), 557-572 (2017).

Анализ множественно картированных прочтений в Red-C эксперименте

Е.А. Бердникович¹, А.А. Жарикова^{1,2,3}, А.А. Миронов^{1,2}

¹ Факультет биоинженерии и биоинформатики МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия

³ Научно-исследовательский институт физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

berdnikoviche99@gmail.com

Аннотация. На данный момент, существует большое количество протоколов, позволяющих анализировать NGS данные, полученные из разнообразных геномных исследований. К сожалению, большое количество алгоритмов не учитывают прочтения, картированные более одного раза. Такое допущение при обработке данных не дает полноценного представления об организации хроматина и не принимает во внимание повторяющиеся последовательности, которые являются частью генома [1,2].

В данном исследовании были взяты данные ДНК-РНК интерактома, полученные в результате эксперимента Red-C[3] для линии клеток K562 человека. На данном примере были исследованы особенности множественно картированных прочтений и выявлены некоторые интересные закономерности в распределении картировок РНК прочтений на 21 хромосоме.

Ключевые слова: Red-C, множественно картированные прочтения, РНК-ДНК интерактом.

1 Введение

Как известно, геном эукариот населен огромным количеством повторов: по последним данным в человеческом геноме повторяющиеся последовательности составляют порядка 66%–69%[4]. Среди таких повторов есть Alu элементы, число копий которых значительно превышает 1 миллион в геноме человека. Также мы знаем, что в различных биологических экспериментах, включающих этап высокопроизводительного секвенирования, получают прочтения короткой длины.

По перечисленным биологическим и техническим причинам возникает проблема множественного картирования. В Red-C эксперименте множественно картированные прочтения составляют порядка 20-40% от общего числа прочтений.

Алгоритма для соотнесения множественно картированных прочтений в составлении карт РНК-хроматиновых контактов не существует. В стандартных протоколах, используемых на данный момент, множественно картированные прочтения не учитываются при анализе. Такие прочтения могут отражать взаимодействия повторяющихся элементов генома или взаимодействия РНК, происходящих из них. Повторяющиеся элементы зачастую несут регуляторную роль. Следовательно, на картах контактов образуются пробелы, не несущие никакой информации о взаимодействиях.

2 Цель

Исследовать множественно картированные прочтения, полученные из протоколов по изучению РНК-ДНК интерактома.

3 Задачи

1. Картировать ДНК и РНК части прочтения на референсный геном.
2. Отфильтровать результаты картирования.
3. Построить распределения числа прочтений в зависимости от количества мест их картирования.
4. Аннотировать последовательности прочтений с помощью инструмента RepeatMasker.
5. Сформировать выборку прочтений для 20-ой, 21-ой и 22-ой хромосом.

4 Результаты

4.1 Распределения числа прочтений в зависимости от количества мест их картирования

Были построены распределения для всех ДНК и РНК картированных прочтений по отдельности (см. Рис. 1).

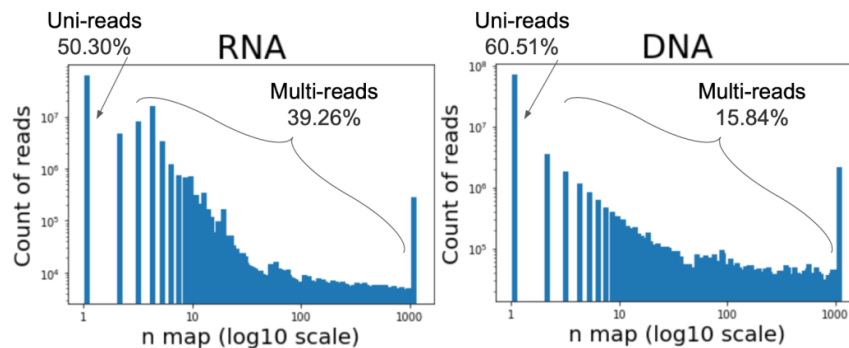


Рис. 1. Распределение количества прочтений в зависимости от количества их мест картировок. На (А) представлено данное распределение для РНК прочтений, на из В - для ДНК.

На графике представлено БОльшее количество уникально картированных прочтений и распределение для множественно картированных прочтений.

Также происходит накопление прочтений в районе, соответствующем 1000 местам картировок. Это вызвано установленными параметрами алгоритма картировки: прочтение не может быть выровнено больше 1000 раз. Таким образом, прочтения с 1000 и большим количеством картировок оказываются представленными в данном пике.

4.2 Аннотация RepeatMasker

Была проведена аннотация с помощью RepeatMasker выборки прочтений ДНК. Анализировались последовательности прочтений с помощью внутренних алгоритмов RepeatMasker. В результате, были найдены паттерны всего в 1 проценте прочтений из анализируемой выборки.

4.3 Формирование выборки

Была сформирована маленькая выборка прочтений. Для такой выборки были взяты прочтения, которые картируются до 10 раз на геном и приходятся только на 20-21-22-ые хромосомы.

На данном этапе было обнаружено, что РНК прочтений на 21 хромосоме сильно больше, чем на остальных хромосомах. Для анализа данного явления было построено покрытие 21 хромосомы РНК картировками (см. Рис. 2).

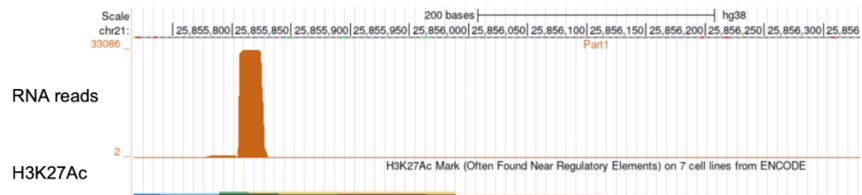


Рис. 2. Покрытие местами картирования фрагмента 21-ой хромосомы (18,141,825 - 28,568,159) для РНК прочтений.

На Рис. 2 были обнаружены пики шириной в 30 нуклеотидов. Согласно аннотации Gencode на данные участки не приходится известных генов. При этом, на данном участке видны пики в данных ChIP-seq, которые отражают расположение эпигенетических меток H3K27Ac. Как известно, данная модификация обычно находится вблизи регуляторных элементов.

5 Выводы

1. Наблюдается накопление прочтений, которые приходятся на менее чем 10 и на более чем 1000 мест картировок.
2. Аннотация последовательностей прочтений показала, что большая часть прочтений не распознается как повторяющиеся элементы алгоритмом Repeat-Masker.
3. Была сформирована выборка множественно картированных прочтений для 20-ой, 21-ой и 22-ой хромосомы.
4. На 21-ой хромосоме картировки РНК-прочтений образуют скопления в не аннотированных генами областях.

Ссылки

1. Sun JH, Zhou L, Emerson DJ, Phyto SA, Titus KR, Gong W, Gilgenast TG, Beagan JA, Davidson BL, Tassone F, Phillips-Cremins JE: Disease-Associated Short Tandem Repeats Co-localize with Chromatin Domain Boundaries. *Cell* 175(1), 224-238.e15 (2018).
2. Cournac, A., Koszul, R., & Mozziconacci, J. The 3D folding of metazoan genomes correlates with the association of similar repetitive elements. *Nucleic Acids Research* 44(1), 245–255 (2015).
3. Gavrilov, A. A., Zharikova, A. A., Galitsyna, A. A., Luzhin, A. V., Rubanova, N. M., Golov, A. K., ... Razin, S. V: Studying RNA–DNA interactome by Red-C identifies noncoding RNAs associated with various chromatin types and reveals transcription dynamics. *Nucleic Acids Research* 48(12), 6699-6714 (2020).
4. De Koning, A. P. J., Gu, W., Castoe, T. A., Batzer, M. A., & Pollock, D. D.: Repetitive Elements May Comprise Over Two-Thirds of the Human Genome. *PLoS Genetics* 7(12), e1002384. d (2011).

On possible disruption of CTCF-cohesin interaction in *Drosophila melanogaster* ^{*}

Aleksandra Galitsyna^{1,2,3}[0000–0001–8969–5694]

¹ Center of Life Sciences, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

² A.A. Kharkevich Institute for Information Transmission Problems, RAS, Moscow, Russia

Abstract. Loop extrusion is a widespread model of chromatin structure formation in eukaryotic cells. Extruder protein moving on DNA and boundary elements are two main components of this model. The positioning of boundary elements results in the insulation at the boundary of TADs. While the SMC complex typically represents the extruder, boundary elements vary between species. In particular, in *Drosophila melanogaster*, up to 12 architectural proteins were claimed to contribute to the insulated boundary formation. While it is debated whether these proteins are indeed insulators and under what condition in the cells, we ponder the possible evolutionary reasons that might have led to multiple insulators in *Drosophila*.

Keywords: *Drosophila* · Loop extrusion · Insulators · Chromatin structure.

Introduction Currently, there are two primary mechanisms that play a role in global mammalian chromatin structure formation: loop extrusion and compartmentalization [1]. Minor and more targeted mechanisms contribute, such as the formation of Polycomb loops [2, 3]. While the mechanisms and factors of compartmentalization are debated [4], the critical players of loop extrusion are well-known, at least in mammals. There, structural maintenance of chromosome (SMC) complexes (typically, cohesin) act as extruding factors, and DNA-binding protein CTCF serves as barrier element [5]. This barrier element stops the spreading of SMC-dependent loop by interaction with barrier element [6, 7], leading to formation of chromatin peaks (or loops) and boundaries of Topologically Associating Domains (TADs).

In mammals, this mechanism was confirmed by the studies of cohesin and CTCF depletion [8, 9], and may involve different regulators [10]. The positioning of CTCF contributes significantly to the contact probability prediction for the Hi-C experiment [11–13]. Convergent sites for CTCF binding dictate the insulation of interactions, detectable as boundaries of TADs in mammals [5].

^{*} The study was supported by RFBR grant 19-34-90136 and Skoltech Fellowship in Systems Biology

While SMC proteins have notable conservation across the domains of life [14] claiming to be a widespread, if not universal mechanism of chromatin factor, CTCF has appeared in evolution only recently [15]. More studies on global chromatin organization in multiple species emerge, providing the interconnection between the presence of CTCF in the genome and the patterns of chromatin folding and regulation [16, 17].

In non-mammalian species with no CTCF, various factors were proposed to serve as barrier elements for loop extrusion instead, including moving polymerase in bacteria [18], Dosage Compensation Complex (DCC) in *C. elegans* [19] and cohesin itself in yeast [20]. However, non-mammalian species with CTCF, such as insect *Drosophila melanogaster*, demonstrate yet another scenario complicating our understanding of the regular loop extrusion model and calling into question the presence of this mechanism in insects [21].

In particular, CTCF binding is not enriched at TAD boundaries in most cell lines of *Drosophila* [22], except neuronal cell line BG3 [23]. Instead, there are up to 8 other motifs in the genome found to be enriched at the TAD boundaries [24]. Some studies report the collection of 12 architectural proteins that contribute to the structure formation in *Drosophila* [11]. However, the exact mechanisms of action of these insulator proteins are not studied in detail. For example, [25] proposes that pairs of proteins BEAF-32/CP190 and BEAF-32/Chromator can act instead of the usual CTCF/cohesin pair.

DNA binding motif of CTCF is enriched in the genome and across *Drosophila* [15]; thus, we can confirm that CTCF indeed binds DNA in *Drosophila* and plays at least some crucial role in the life of its cells. The motif itself is very similar to those in mammals [26]. However, the interaction of CTCF with other proteins might serve as a structural basis for cohesin/CTCF coupling and has not been studied in *Drosophila*.

Results In this research, we focus on the structural basis for CTCF binding to cohesin subunits. We consider a recent study on the crystal structure of SA2-Scc1 in complex with CTCF [6] in mammals. There, the authors report conserved essential surface (CES) between these proteins. The homologs of all three proteins exist in *Drosophila* [27]. Moreover, CES is highly conserved from fungi to mammals. To confirm this, we aligned the sequences of CTCF, SA2 and Scc1 from multiple mammalian and three *Drosophila* species (see Fig. 1). We observed the presence of the putative conserved motif in distant *Drosophila* species. As expected, they deviate from the mammalian motif. Notably, this motif is less conserved between *Drosophila* species than between mammalian species.

We map the substitutions that happened in the course of evolution between *Drosophila* and mammals to the three-dimensional structure of SA2-Scc1-CTCF complex. Indeed, we find that the crucial amino acids were replaced (see Fig. 2). Most importantly, the SA2 D326 residue is replaced by proline. In mammals, D326 residue of SA2 forms hydrogen bond with Y226 of CTCF. This bond is necessary for the SA2-Scc1-CTCF interaction, and mutagenesis of Y226 leads to disruption of complex interaction and abolition of loops on Hi-C maps. In

```

XP_025867294.1/1-725          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_005051911.1/1-725          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
Liponmhmhm_qp_02897383.1/1-725 -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_020020321.1/1-727          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_004645883.1/1-727          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
Hmhm4CTCF_000494111CTCF_HUMAN/11-727 -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
Musmhm_qp_010157376.1/1-725 -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_004949101.1/1-728          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_017729264.1/1-728          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_001090101.1/1-728          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_017328231.1/1-727          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_005375508.1/1-728          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_000966721.1/1-722          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_005375508.1/1-728          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_005708001.1/1-724          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
Mus_scc1/1647CTCF_0002871-726 -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_000792321.1/1-724          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_014675919.1/1-724          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
XP_008872631.1/1-740          -----QPPAKTKTEKESK-----LRYTEEGKRDVSVVDFEEIQQEGLLSEVNAEKV-----VCMNMFPPPTIKKK-----
Dmhm_01020520205205205205205205205205 -----LRLKLELVDFDLSMVFELSDTVVLSKAVE---AAATFLKQNSSEKVEGMAIE---DAVLEFD-DRKDLDF-----VLSSEVLEKFA-SASQNAS
Drosophila_qp_017963923.1/1-812 -----LRLKLELVDFDLSMVFELSDTVVLSKAVE---AA--VLGSDNREVFVEEDMAEK---TADSEVVD-DRKDLDF-----VLSSEVLEKFA-SASQNAS
Drosophila_FC_qp_017963923.1/1-817 -----LRLKLELVDFDLSMVFELSDTVVLSKAVE---AAATFLKQNSSEKVEGMAIE---DAVLEFD-DRKDLDF-----VLSSEVLEKFA-SASQNAS

```

Fig. 1. Multiple alignment of CTCF in mammals (19 species) and three *Drosophila* species. The fragment is centered at CES motif (denoted in red)

Drosophila, D326 of SA2 is replaced by very rigid amino acid that does not form conventional hydrogen bonds [28] and thus cannot form the key bond responsible for cohesin-CTCF attachment in the same manner as in mammals.

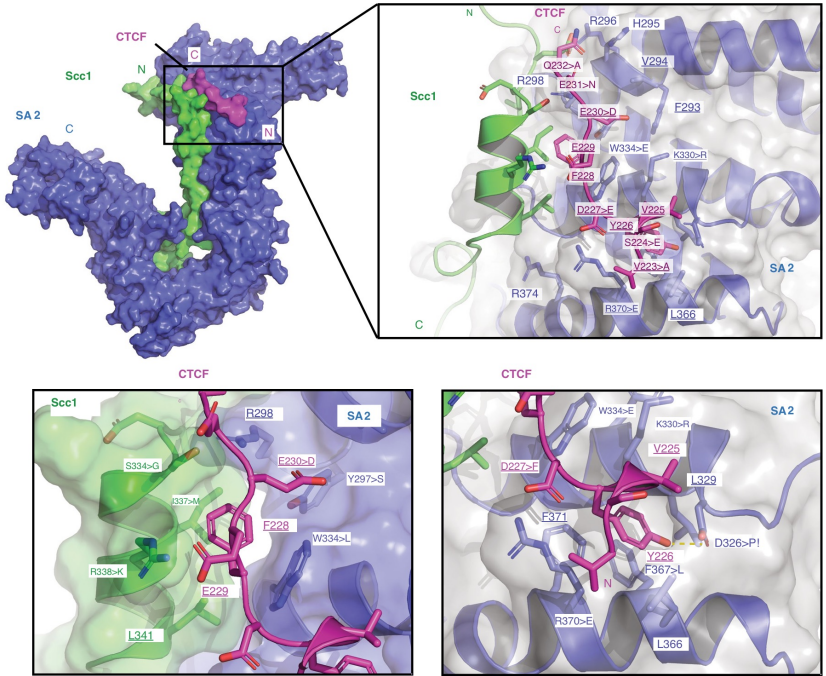


Fig. 2. Key substitutions in Conserved Essential Surface (CES) of *Drosophila* mapped to the 3D structure of SA2-Scc1-CTCF complex. Underlined amino acids are not changed in *Drosophila* or have similar biochemical properties. The image is based on surface-rendered cartoon from [6]

In line with the model of expansion of boundary elements around the gene starts [29], we propose that this substitution might be crucial for the evolution of regulatory mechanisms in *Drosophila*. We speculate that it lead to the burst of adaptation of other DNA binding proteins as novel insulators. As a result, we observe several interchangeable insulator proteins contributing to insulated boundaries formation in the chromatin of *Drosophila melanogaster*.

Discussion We note that D326P substitution in CTCF might be compensated by substitutions in other amino acids of CES or surrounding hydrophobic pocket. These substitutions can lead to the restoration of the specificity of CTCF to the SA2-Scc1 complex. However, substitution to proline disrupts the protein’s local secondary structure, complicating the evolutionary path towards the restoration of complex formation. Thus, we suggest that this substitution might at least decrease the specificity of CTCF to SA2-Scc1 complex (upon the assumption that it forms and plays a functional role in *Drosophila*).

Even though there is no confirmation of active loop extrusion by cohesin in *Drosophila*, we suggest that high conservation of extrusion machinery proteins indirectly signifies its presence and importance for promoter-enhancer interactions. We propose the scenario where disrupted specificity to CTCF leads to ”leaking” extrusion with impaired regulation. Thus additional barriers (such as BEAF-32, Su(Hw), and other proposed insulator protein) emerge in the evolution of *Drosophila* ancestors as compensation for CTCF barrier weakening.

We note that some other mechanisms of regulation and DNA compaction might take over instead of loop extrusion. Polycomb binding is reserved for fine-tuning of cell-specific genes expression during development [3] and thus cannot serve as universal compensation. Compartmentalization, given its under-investigated mechanism, presents a promising potential mechanism that can compensate loop extrusion perturbations in *Drosophila*.

References

1. J. Nuebler, G. Fudenberg, M. Imakaev, N. Abdennur, and L. A. Mirny, “Chromatin organization by an interplay of loop extrusion and compartmental segregation,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, no. 29, pp. E6697–E6706, 2018.
2. Z. Du, H. Zheng, Y. K. Kawamura, K. Zhang, J. Gassler, S. Powell, Q. Xu, Z. Lin, K. Xu, Q. Zhou, *et al.*, “Polycomb group proteins regulate chromatin architecture in mouse oocytes and early embryos,” *Molecular Cell*, vol. 77, no. 4, pp. 825–839, 2020.
3. K. P. Eagen, E. L. Aiden, and R. D. Kornberg, “Polycomb-mediated chromatin loops revealed by a subkilobase-resolution chromatin interaction map,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, no. 33, pp. 8764–8769, 2017.
4. F. Erdel, A. Rademacher, R. Vlijm, J. Tunnermann, L. Frank, R. Weinmann, E. Schweigert, K. Yserentant, J. Hummert, C. Bauer, *et al.*, “Mouse heterochromatin adopts digital compaction states without showing hallmarks of hp1-driven liquid-liquid phase separation,” *Molecular cell*, 2020.

5. S. S. Rao, M. H. Huntley, N. C. Durand, E. K. Stamenova, I. D. Bochkov, J. T. Robinson, A. L. Sanborn, I. Machol, A. D. Omer, E. S. Lander, *et al.*, “A 3d map of the human genome at kilobase resolution reveals principles of chromatin looping,” *Cell*, vol. 159, no. 7, pp. 1665–1680, 2014.
6. Y. Li, J. H. Haarhuis, Á. S. Cacciatore, R. Oldenkamp, M. S. van Ruiten, L. Willems, H. Teunissen, K. W. Muir, E. de Wit, B. D. Rowland, *et al.*, “The structural basis for cohesin–ctcf-anchored loops,” *Nature*, vol. 578, no. 7795, pp. 472–476, 2020.
7. G. Fudenberg, N. Abdennur, M. Imakaev, A. Goloborodko, and L. A. Mirny, “Emerging evidence of chromosome folding by loop extrusion,” in *Cold Spring Harbor symposia on quantitative biology*, vol. 82, pp. 45–55, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2017.
8. E. P. Nora, A. Goloborodko, A.-L. Valton, J. H. Gibcus, A. Uebersohn, N. Abdennur, J. Dekker, L. A. Mirny, and B. G. Bruneau, “Targeted degradation of ctfc decouples local insulation of chromosome domains from genomic compartmentalization,” *Cell*, vol. 169, no. 5, pp. 930–944, 2017.
9. S. S. Rao, S.-C. Huang, B. G. St Hilaire, J. M. Engreitz, E. M. Perez, K.-R. Kieffer-Kwon, A. L. Sanborn, S. E. Johnstone, G. D. Bascom, I. D. Bochkov, *et al.*, “Cohesin loss eliminates all loop domains,” *Cell*, vol. 171, no. 2, pp. 305–320, 2017.
10. G. Wutz, C. Várnai, K. Nagasaka, D. A. Cisneros, R. R. Stocsits, W. Tang, S. Schoenfelder, G. Jessberger, M. Muhar, M. J. Hossain, *et al.*, “Topologically associating domains and chromatin loops depend on cohesin and are regulated by ctfc, wapl, and pds5 proteins,” *The EMBO journal*, vol. 36, no. 24, pp. 3573–3599, 2017.
11. M. J. Rowley, M. H. Nichols, X. Lyu, M. Ando-Kuri, I. S. M. Rivera, K. Hermetz, P. Wang, Y. Ruan, and V. G. Corces, “Evolutionarily conserved principles predict 3d chromatin organization,” *Molecular cell*, vol. 67, no. 5, pp. 837–852, 2017.
12. P. S. Belokopytova, M. A. Nuriddinov, E. A. Mozheiko, D. Fishman, and V. Fishman, “Quantitative prediction of enhancer–promoter interactions,” *Genome Research*, vol. 30, no. 1, pp. 72–84, 2020.
13. G. Fudenberg, D. R. Kelley, and K. S. Pollard, “Predicting 3d genome folding from dna sequence,” *BioRxiv*, p. 800060, 2019.
14. N. Cobbe and M. M. Heck, “The evolution of smc proteins: phylogenetic analysis and structural implications,” *Molecular biology and evolution*, vol. 21, no. 2, pp. 332–347, 2004.
15. P. Heger, B. Marin, M. Bartkuhn, E. Schierenberg, and T. Wiehe, “The chromatin insulator ctfc and the emergence of metazoan diversity,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, no. 43, pp. 17507–17512, 2012.
16. R. D. Acemel, I. Maeso, and J. L. Gómez-Skarmeta, “Topologically associated domains: a successful scaffold for the evolution of gene regulation in animals,” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Developmental Biology*, vol. 6, no. 3, p. e265, 2017.
17. J. Dekker and E. Heard, “Structural and functional diversity of topologically associating domains,” *FEBS letters*, vol. 589, no. 20, pp. 2877–2884, 2015.
18. H. B. Brandão, P. Paul, A. A. van den Berg, D. Z. Rudner, X. Wang, and L. A. Mirny, “Rna polymerases as moving barriers to condensin loop extrusion,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, no. 41, pp. 20489–20499, 2019.
19. E. Crane, Q. Bian, R. P. McCord, B. R. Lajoie, B. S. Wheeler, E. J. Ralston, S. Uzawa, J. Dekker, and B. J. Meyer, “Condensin-driven remodelling of x chromo-

- some topology during dosage compensation,” *Nature*, vol. 523, no. 7559, pp. 240–244, 2015.
20. L. Costantino, T.-H. S. Hsieh, R. Lamothe, X. Darzacq, and D. Koshland, “Cohesin residency determines chromatin loop patterns,” *bioRxiv*, 2020.
 21. N. E. Matthews and R. White, “Chromatin architecture in the fly: Living without ctcf/cohesin loop extrusion? alternating chromatin states provide a basis for domain architecture in drosophila,” *BioEssays*, vol. 41, no. 9, p. 1900048, 2019.
 22. S. V. Ulianov, E. E. Khrameeva, A. A. Gavrillov, I. M. Flyamer, P. Kos, E. A. Mikhaleva, A. A. Penin, M. D. Logacheva, M. V. Imakaev, A. Chertovich, *et al.*, “Active chromatin and transcription play a key role in chromosome partitioning into topologically associating domains,” *Genome research*, vol. 26, no. 1, pp. 70–84, 2016.
 23. K. T. Chathoth and N. R. Zabet, “Chromatin architecture reorganization during neuronal cell differentiation in drosophila genome,” *Genome research*, vol. 29, no. 4, pp. 613–625, 2019.
 24. F. Ramírez, V. Bhardwaj, L. Arrigoni, K. C. Lam, B. A. Grüning, J. Villaveces, B. Habermann, A. Akhtar, and T. Manke, “High-resolution tads reveal dna sequences underlying genome organization in flies,” *Nature communications*, vol. 9, no. 1, pp. 1–15, 2018.
 25. Q. Wang, Q. Sun, D. M. Czajkowsky, and Z. Shao, “Sub-kb hi-c in d. melanogaster reveals conserved characteristics of tads between insect and mammalian cells,” *Nature communications*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2018.
 26. E. E. Holohan, C. Kwong, B. Adryan, M. Bartkuhn, M. Herold, R. Renkawitz, S. Russell, and R. White, “Ctcf genomic binding sites in drosophila and the organisation of the bithorax complex,” *PLoS Genet*, vol. 3, no. 7, p. e112, 2007.
 27. J.-M. Peters, A. Tedeschi, and J. Schmitz, “The cohesin complex and its roles in chromosome biology,” *Genes & development*, vol. 22, no. 22, pp. 3089–3114, 2008.
 28. P. Chakrabarti and S. Chakrabarti, “C—h o hydrogen bond involving proline residues in α -helices,” *Journal of molecular biology*, vol. 284, no. 4, pp. 867–873, 1998.
 29. X. Ni, Y. E. Zhang, N. Negre, S. Chen, M. Long, and K. P. White, “Adaptive evolution and the birth of ctcf binding sites in the drosophila genome,” *PLoS Biol*, vol. 10, no. 11, p. e1001420, 2012.

База данных RNA-Chrom открывает новые возможности для анализа РНК-хроматинового интерактома

Рябых Г.К.^{1,2}, Сигорских А.И.¹, Коростелев Ю.Д.²,

Жарикова А.А.^{1,2,3}, Миронов А.А.^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Факультет биоинженерии и биоинформатики, Москва, Россия

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия

³ Научно-исследовательский институт физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ryabykhgrigory@gmail.com

Аннотация. Аналитическая база данных RNA-Chrom содержит координаты миллионов контактов десятков тысяч РНК человека и мыши с хроматином. Через веб-интерфейс (<https://rnachrom2.bioinf.fbb.msu.ru/>) были реализованы два подхода к анализу РНК-хроматинового интерактома. Первый: выяснить, контактирует ли с хроматином интересующая пользователя РНК, и если да, то с какими генами или ДНК-локусами? Второй: выяснить, какие РНК контактируют с интересующим пользователя ДНК-локусом (и вероятно участвуют в его регуляции), и если такие есть, то каков характер их взаимодействия? Более детально изучить карты контактов и сравнить их с другими данными можно с помощью UCSC Genome Browser.

Ключевые слова: некодирующие РНК, карты контактов, хроматин.

Как известно, кодирующие и некодирующие транскрипты могут выполнять свои функции не только в цитоплазме, но и в ядре клетки, где активно участвуют в процессах регуляции транскрипции, в ремоделировании и поддержании пространственной структуры хроматина. Среди методов, изучающих механизмы взаимодействия некодирующих РНК с хроматином, модификаторами хроматина или с другими белками, можно выделить два класса методов: “один-против-всех” (RAP, CHART-seq, ChIRP-seq, dChIRP-seq, ChOP-seq, CHIRT-seq) и “все-против-всех” (MARGI, GRID-seq, iMARGI, RADICL-seq, Red-C) [1].

Нами была разработана база данных RNA-Chrom, которая содержит не только обработанные универсальным пайплайном данные типа “один-против-всех” (более 150 датасетов, более чем для 50 РНК человека и мыши) и “все-против-всех” (более 35 датасетов, включающих в себя контакты десятков

тысяч РНК), но и подробные метаданные обо всех экспериментах. Главным ее отличием по сравнению с другими базами данных является то, что она, во-первых, “РНК-хроматиновый интерактом”-центричная база данных, а не РНК-центричная как, например, LnChrom [2] или RNAInter [3], которые стараются описать с помощью самых разных данных некодирующие РНК с разных сторон. Благодаря этому RNA-Chrom является на данный момент наиболее полной базой данных, отражающей все доступные на сегодняшний момент полногеномные РНК-хроматиновые взаимодействия, а также включает в себя улучшенные нормировки и фильтры. Во-вторых, удобный веб-интерфейс (<https://tnachrom2.bioinf.fbb.msu.ru/>) позволяет пользователю провести в реальном времени полноценное исследование своего объекта: это может быть интересующая его РНК или ДНК-локус.

В случае РНК пользователю будет предложен набор аналитических графиков, отражающих характер взаимодействия выбранной РНК со всем геномом, а также таблица с генами и околочными областями, с которыми выбранная РНК контактирует наибольшим образом. Для более детального изучения карт контактов выбранной РНК пользователь может отправить их в UCSC Genome Browser [4], где в том числе можно сопоставить выбранные карты контактов с другими треками, например, с метилированием ДНК или гистоновыми метками.

В случае ДНК-локуса пользователю будет предложен список контактирующих с выбранным локусом РНК, включающий разные метрики силы их контактируемости. Выбрав из списка одну РНК, пользователю будут доступны все возможности, описанные выше, при условии, что карта контактов будет ограничена выбранным изначально ДНК-локусом.

Список литературы

1. Ryabykh G.K., Mylarshchikov D.E., Kuznetsov S.V., Sigorskikh A.I., Ponomareva T.Y., Zharikova A.A. and Mironov A.A., RNA–Chromatin Interactome: What? Where? When?. *Mol Biol* 56, 210–228 (2022).
2. Fulong Yu, Guanxiong Zhang, Aiai Shi, Jing Hu, Feng Li, Xinxin Zhang, Yan Zhang, Jian Huang, Yun Xiao, Xia Li, Shujun Cheng, LnChrom: a resource of experimentally validated lncRNA–chromatin interactions in human and mouse, *Database*, Volume 2018, 2018.
3. Juanjuan Kang, Qiang Tang, Jun He, Le Li, Nianling Yang, Shuiyan Yu, Mengyao Wang, Yuchen Zhang, Jiahao Lin, Tianyu Cui, Yongfei Hu, Puwen Tan, Jun Cheng, Hailong Zheng, Dong Wang, Xi Su, Wei Chen, Yan Huang, RNAInter v4.0: RNA interactome repository with redefined confidence scoring system and improved accessibility, *Nucleic Acids Research*, Volume 50, Issue D1, 2022.
4. Kent WJ, Sugnet CW, Furey TS, Roskin KM, Pringle TH, Zahler AM, Haussler D. The human genome browser at UCSC. *Genome Res*. 2002 Jun;12(6):996-1006.

Динамика dN/dS на малых эволюционных расстояниях

Е. Белоусова¹, А. Столярова², А. Кондрашов^{1,3}, Г. Базыкин^{2,4}

¹ Факультет биоинженерии и биоинформатики МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

² Центр Наук о Жизни, Сколковский институт науки и технологий, Сколково, Россия

³ Мичиганский университет, Анн-Арбор, США

⁴ Институт проблем передачи информации РАН, Москва, Россия

evgenia.belousova7834@gmail.com

Аннотация. Для измерения давления отбора на эволюционирующие последовательности используется показатель dN/dS . Изначально этот показатель был разработан для применения на больших эволюционных расстояниях, но зачастую используется и для видов, разошедшихся недавно, и в случаях, когда сложно определить границы видов. Существует теоретическое выражение для dN/dS популяций в состоянии равновесия, однако до достижения равновесия установить зависимости между показателями dN , dS (то есть, эволюционным расстоянием) и dN/dS сложно. Наше предположение состоит в том, что если на только что отделившуюся популяцию действует положительный отбор, то в ней положительные мутации могут сначала фиксироваться быстрее, чем нейтральные, что приведет к более высокому dN/dS , чем при этих же параметрах в условиях равновесия. По мере накопления нейтральных замен dN/dS будет падать до своего равновесного значения. В этой работе мы проводим симуляции эволюции при разделении родительской популяции на две дочерние и сравниваем наши результаты с известными на данный момент теоретическими зависимостями dN/dS от времени.

Ключевые слова: Теоретическая популяционная генетика, dN/dS , Детекция положительного отбора.

1 Введение

Рассмотрим ситуацию, в которой предковая популяция разделяется на две дочерние. Известно, что фиксация аллелей, находящихся под положительным отбором, происходит быстрее, чем нейтральных (т.е. тех, на которые не действует отбор) [1]. Поэтому наша гипотеза состоит в том, что при действии положительного отбора на малых эволюционных расстояниях после момента разделения двух популяций, положительные мутации будут фиксироваться быстрее, чем нейтральные, из-за чего dN/dS сначала будет высоким, а затем будет снижаться по мере того, как снижается скорость фиксации положительных мутаций, и в результате асимптотически стремиться к своему равновесному значению при данной силе отбора. Эту гипотезу мы продемонстрировали с помощью симуляции эволюции двух разделившихся популяций под сильным положительным отбором (рисунок 1). На рисунке 1 видно, как положительные мутации в начале фиксируются быстрее (розовые траектории закрепления). А поскольку скорость фиксации нейтральных замен после разделения родительской популяции не меняется (характерное время фиксации нейтрального аллеля

= N [2]), мы предполагаем, что dN/dS после разделения популяции сначала будет очень высоким, а затем, когда скорость фиксации несинонимических замен будет снижаться, dN/dS будет падать и асимптотически стремиться к своему равновесному значению [3] (как на рисунке 1, начиная, примерно, с 100 поколений).

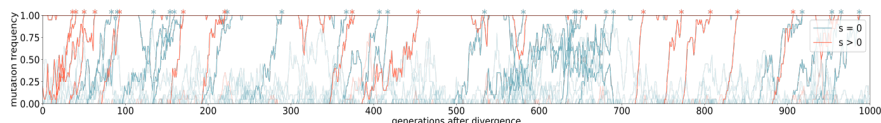


Рис. 1. Динамика частот несинонимических (показаны розовым) и синонимических (показаны голубым) мутаций в одной из двух дочерних популяций, на которые разделилась родительская популяция. Нулевой момент времени – это момент разделения. Звездочкой отмечен момент закрепления мутации. На положительные мутации действует отбор силы $s = 0,4$; пропорция сайтов, находящихся под отбором к нейтральным = $1 : 10$.

Таким образом, цель нашего исследования: изучить динамику скорости фиксации синонимических (dS), несинонимических (dN) различий и их отношения (dN/dS) между дивергирующими популяциями на малых эволюционных расстояниях на основе симуляций эволюции.

Задачи работы:

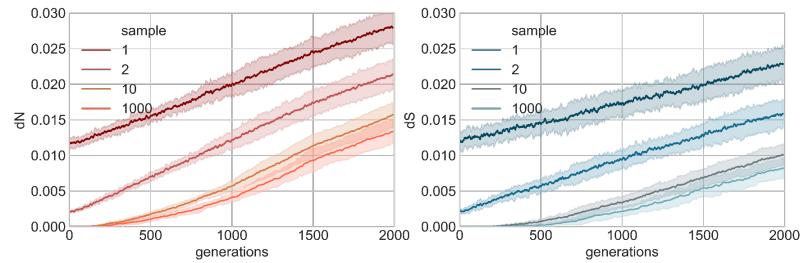
1. Построить зависимости dN , dS и dN/dS от времени (измеренном в числе поколений с момента дивергенции двух популяций после достижения изначальной популяцией равновесия) на основе симуляций эволюции. Рассмотреть влияние на эти зависимости таких параметров, как размер выборки, для которой подсчитывается dN/dS , и скорость рекомбинации;
2. Сравнить динамику накопления положительных и нейтральных несинонимических замен и их влияние на динамику dN/dS на малых эволюционных расстояниях;
3. Изучить динамику dN/dS также в присутствии отрицательного отбора.

2 Результаты

2.1 Динамика dN , dS и dN/dS под положительным отбором

Сначала мы рассмотрим симуляции, в которых на несинонимические сайты в последовательностях действует положительный отбор. В симуляциях в геномах могут происходить мутации трех типов: несинонимические положительные под отбором силы $s=0,1$, несинонимические нейтральные и синонимические нейтральные, при этом пропорция сайтов, в которых происходят мутации этих типов по геному = $1 : 200 : 100$, соответственно. Также мы варьировали скорость рекомбинации, и размер выборки, для которой подсчитывался dN/dS , результаты показаны на рисунке 2.

A)



B)

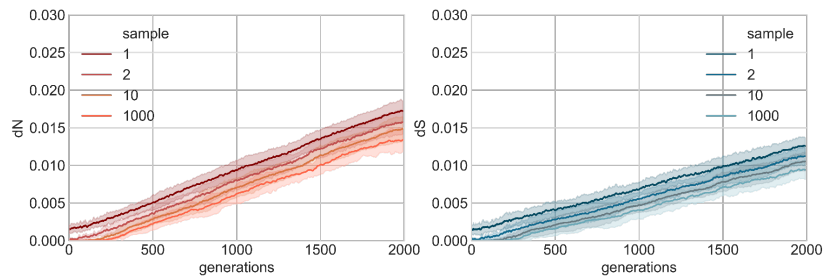


Рис. 2. Зависимости dN и dS от времени для разных выборок (sample) и скорости рекомбинации А) 0,5 и В) $1e-6$. Прозрачной площадью показано стандартное отклонение распределения dN или dS по 10 симуляциям в каждом поколении. На положительные мутации действует отбор силы $s = 0,1$; пропорция несинонимических сайтов, находящихся под отбором, к несинонимическим нейтральным к синонимическим = 1 : 200 : 100.

Мы видим, что накопление и dN , и dS во всех случаях близко к линейному, причем для малых размеров выборок (1 и 2) dN и dS начинают копиться не с нуля. Это объясняется тем, что в популяции на момент разделения есть некоторое распределение полиморфизмов, которые мы и видим, когда считаем число различий между парой геномов. А вот для БОльших выборок dN и dS сначала равны нулю, а затем начинают накапливаться со скоростью, близкой к линейной, но в начале несколько заниженной.

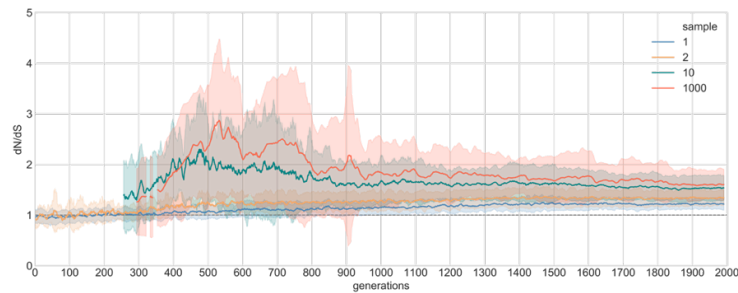
Заметим, что для больших выборок dN не проходит через ноль, а начинает расти с какого-то момента, точно так же себя ведет dS , но начинает расти несколько позже. Похоже, что именно это могло бы обеспечивать динамику dN/dS , которую мы ожидаем увидеть: высокий dN/dS в начале, снижающийся по мере достижения популяцией равновесия (под равновесием понимается состояние популяции, при котором вероятность фиксации аллеля не меняется со временем).

Заметим также, что чем больше размер выборки, тем позже dN и dS начинают расти. Это объясняется тем, что, когда выборка мала, некоторые еще не зафиксировавшиеся мутации могут быть детектированы, как замены, но чем больше выборка, тем меньше таких мутаций, а для размера выборки, равного размеру популяции, таких мутаций нет совсем.

Для малой скорости рекомбинации характерно то, что зависимости для разных выборок более похожи между собой. При этом так же, как и для высокой скорости рекомбинации, зависимости для dN и для dS похожи друг на друга, но при максимальной выборке dS начинает расти позже, чем dN.

Далее рассмотрим динамику dN/dS во времени (рисунок 3).

А)



В)

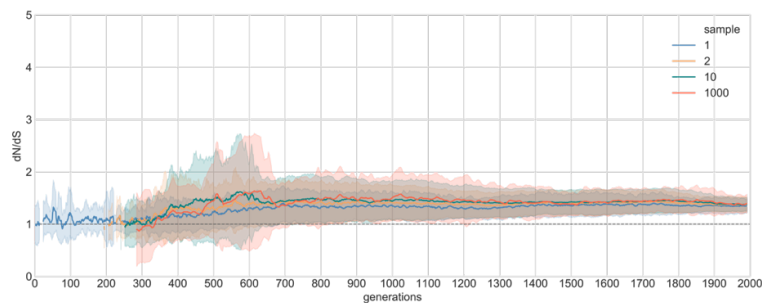


Рис. 3. Зависимость dN/dS от времени при разных размерах выборки (sample) для скорости рекомбинации А) 0,5; В) 1e-6. Прозрачной площадью показано стандартное отклонение распределения dN/dS по 10 симуляциям в каждом поколении. На положительные мутации действует отбор силы $s = 0,1$; пропорция несинонимических сайтов, находящихся под отбором, к несинонимическим нейтральным к синонимическим = 1 : 200 : 100, пунктирной линией показана единица.

Для большой скорости рекомбинации и для больших выборок мы наблюдаем, что начиная с момента, где dN/dS максимальный (и довольно высокий), он убывает и асимптотически стремится к некоторому равновесному значению. Однако до этого момента там, где dN/dS можно посчитать, он возрастает. Мы думаем, что убывание, действительно, объясняется искомым эффектом: поскольку на популяции действует положительный отбор, несинонимические замены после разделения накапливаются быстрее, чем синонимические, и dN/dS получается завышенный. А для возрастания dN/dS в самом начале у нас точного объяснения нет. В вычислении dN/dS в самом начале после разделения есть стати-

стические трудности, потому что если dS равен нулю, то отношение dN к dS равно бесконечности. Мы должны каким-то образом все равно учитывать эти значения, потому что именно они, скорее всего, вносят вклад в искомый эффект. Авторы исследования [4] использовали для подсчета отношения dN к dS некоторую поправку с псевдокаунтом, поскольку они показали, что именно такая поправка минимизирует вклад статистических эффектов в положительную корреляцию между dS и dN/dS (dS в первом приближении можно принять за время). Однако эта же поправка занижает dN/dS , судя по результатам [4]. Мы использовали такую же поправку, чтобы минимизировать вклад статистических эффектов в dN/dS , однако, возможно, именно поправка такого вида привела к заниженному dN/dS в начале. Другое возможное объяснение положительной корреляции dN/dS со временем в начале состоит в сцеплении между положительными и нейтральными мутациями. То есть из-за того, что некоторые нейтральные мутации сцеплены с положительными, увеличение dN приводит к увеличению и dS , в результате dN/dS получается заниженным. Возможно, хотя мы и рассматриваем максимальную скорость рекомбинации, в начале между некоторыми положительными и нейтральными заменами не успевает произойти рекомбинация. Это до некоторой степени подтверждается результатами для малой скорости рекомбинации (рисунок 3B): мы видим, что для больших выборок отрезок, на котором dN/dS падает сильно сократился, а отрезок, на котором dN/dS растет, наоборот, стал больше.

Для малых выборок (рисунок 3A) мы наблюдаем медленный рост в начале, а затем они также асимптотически стремятся к некоторому значению. Значит, подсчет dN/dS по паре геномов из популяций (или по паре диплоидных геномов) дает довольно опосредованное представление о реальном dN/dS , особенно, пока равновесие не достигнуто. Наши результаты для выборки размера 1 согласуются с теоретическими зависимостями при подобных параметрах в исследовании [5] (рисунок 12, положительные γ).

2.2 Накопление dN различных типов и их влияние на dN/dS

Для того, чтобы проверить, действительно ли положительные мутации в результате становятся заменами, определяющими высокий dN/dS после разделения популяций, мы решили проанализировать динамику накопления различных типов замен. В наших симуляциях в геномах особей присутствовали сайты трех типов: несинонимические под положительным отбором, несинонимические нейтральные, синонимические в соотношении 1 : 200 : 100, соответственно. Таким образом, dN , наблюдаемый в каждом поколении, складывается из двух составляющих: из нейтральных замен и замен, находящихся под отбором. При этом, если, действительно, положительные замены накапливаются быстрее в начале и обуславливают, тем самым, высокий dN/dS , то в начале мы должны увидеть БОльший вклад положительных замен в dN/dS . Мы проанализировали, как менялась со временем скорость накопления несинонимических и синонимических различий. Если мы в каждом поколении будем считать количество зафиксировавшихся именно в этом поколении мутаций (синонимических или несинонимических), отнормированное на число сайтов соответствующих типов, то мы получим зависимость скорости накопления таких замен от времени, то

есть производную от обычной зависимости dN или dS от времени. Такая зависимость представлена на рисунке 4.

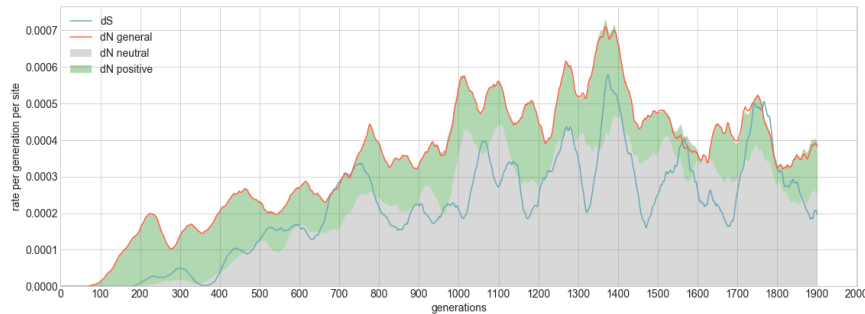


Рис. 4. Зависимость скорости накопления dS и dN разных типов от времени для размера выборки 1000 и скорости рекомбинации 0,5. Приращение для каждого поколения считается на расстоянии 50 поколений, далее значения усредняются скользящим окном длины 50. Суммарный dN показан красной линией, а вклады в него различных типов dN показаны площадью, закрашенной зеленым или серым.

На рисунке 4 мы видим, что в начале на некотором промежутке скорость накопления dN быстро растет, а скорость накопления dS равна нулю. Также мы наблюдаем, как меняется вклад положительных и нейтральных несинонимических замен в общий dN: в самом начале вклад вносят только положительные замены, а затем начинает расти вклад нейтральных замен и, в конце концов, становится больше, чем таковой положительных. Все это говорит в пользу нашей гипотезы. Мы также видим, что динамика скорости накопления нейтральных несинонимических замен по точке начала роста очень похожа на таковую для синонимических замен, чего логично было бы ожидать. Заметно также, что по форме все кривые похожи друг на друга, в том числе зависимости для общего dN и dS. Это еще одно свидетельство в пользу того, что в наших симуляциях синонимические и несинонимические мутации довольно сильно сцеплены (несмотря на максимальную скорость рекомбинации). Это могло бы объяснить немонотонность общей динамики dN/dS для больших выборок после разделения популяций.

2.3 Динамика dN/dS в присутствии отрицательного отбора

Далее мы решили рассмотреть также ситуацию, в которой на некоторые сайты действует сильный положительный отбор, но на большее число сайтов действует отрицательный отбор. В таком случае, мы ожидаем, что dN/dS асимптотически будет стремиться к значению <1 , так что по истечении большого времени после дивергенции положительный отбор детектировать будет невозможно. Но, возможно, изучаемый эффект в начале (когда вклад положительных мутаций большой, а отрицательных – маленький) позволяет детектировать положительный отбор. Результаты этих симуляций представлены на рисунке 5.

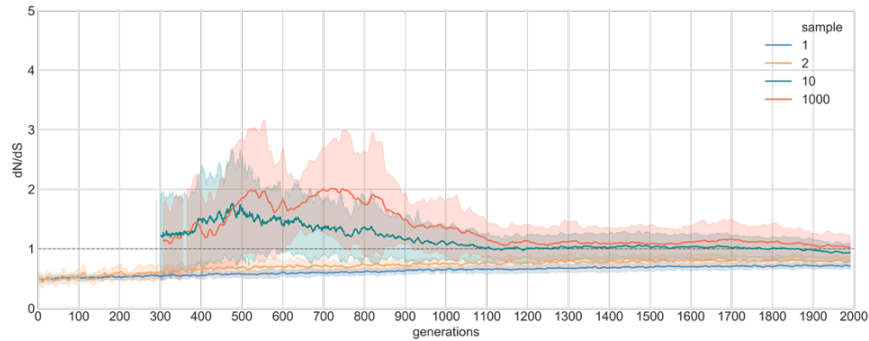


Рис. 5. Зависимость dN/dS от времени при разных размерах выборки (sample) для скорости рекомбинации 0,5. Прозрачной площадью показано стандартное отклонение распределения dN/dS по 10 симуляциям в каждом поколении. На положительные мутации действует отбор силы $s = 0,1$; на отрицательные $s = -1$; пропорция сайтов в геноме 100 (отрицательные) : 1 (положительные) : 100 (несинонимические нейтральные) : 100 (синонимические); пунктирной линией показана единица.

В целом, мы наблюдаем зависимости, похожие на соответствующие на рисунке 3А: в начале на некотором отрезке dN/dS растет до достаточно высокого значения, а затем падает. Интересно, что по прошествии 2000 поколений dN/dS не становится <1 , что означает, что в наших симуляциях dN/dS стремится к значению, которое несколько больше, чем теоретическое для данной силы отбора. Мы думаем, что это объясняется, опять же, сцеплением сайтов под положительным и отрицательным отбором.

3 Выводы

Мы изучили динамику dN/dS от времени с помощью симуляций эволюции и выяснили, что:

1. При действии на дивергировавшие популяции положительного отбора dN начинает расти раньше, чем dS ; при этом размер выборки, на которой подсчитывается dN или dS , влияет на то, в какой момент эти показатели начинают расти, за счет того, что чем меньше выборка, тем раньше в ней можно детектировать полиморфизмы определенной частоты, как замены. dN/dS сразу после разделения популяций растет до некоторого высокого значения, а затем снижается. При низкой скорости рекомбинации наблюдается такое же влияние размера выборки на рост dN и dS , но в зависимости dN/dS от времени становится больше отрезок, на котором dN/dS растет и короче отрезок, на котором он снижается, потому мы предполагаем, что положительная корреляция между dN/dS и временем в начале (сразу после дивергенции) обусловлена эффектами сцепления;

2. После расхождения популяций положительные несинонимические замены копируются быстрее, чем нейтральные несинонимические замены, таким обра-

зом, именно положительные замены вносят больший вклад в dN/dS в начале, а затем их вклад постепенно становится меньше, чем вклад нейтральных замен;

3. В присутствии и положительного, и отрицательного отбора динамика dN/dS также сначала на некотором отрезке возрастает до значения, меньшего, чем при исключительно положительном отборе, а затем убывает и асимптотически стремится к некоторому значению, которое в наших симуляциях получилось >1 , предположительно, за счет эффектов сцепления.

Ссылки

1. Yang, Z., Nielsen, R., Goldman, N., & Pedersen, A. M. (2000). Codon-substitution models for heterogeneous selection pressure at amino acid sites. *Genetics*, 155(1), 431–449.
2. Keightley, P. D., & Eyre-Walker, A. (2012). Estimating the rate of adaptive molecular evolution when the evolutionary divergence between species is small. *Journal of molecular evolution*, 74(1-2), 61–68.
3. Kryazhimskiy, S., & Plotkin, J. B. (2008). The population genetics of dN/dS. *PLoS genetics*, 4(12), e1000304.
4. Stoletzki, N., & Eyre-Walker, A. (2011). The positive correlation between dN/dS and dS in mammals is due to runs of adjacent substitutions. *Molecular biology and evolution*, 28(4), 1371–1380.
5. Mugal, C. F., Wolf, J. B., & Kaj, I. (2014). Why time matters: codon evolution and the temporal dynamics of dN/dS. *Molecular biology and evolution*, 31(1), 212–231.

Поиск гетеродуплексов в данных взаимодействия РНК с хроматином

Марков И.К.¹, Рябых Г.К.^{1,2}, Миронов А.А.^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Факультет биоинженерии и биоинформатики, Москва, Россия

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия
ivan.markov@student.msu.ru

Аннотация. На данный момент известны случаи применения комплементарных РНК-конструкций для сайленсинга генов [1]. Также известно, что в природе РНК могут образовывать с ДНК структуры, называемые R-петлями, и таким образом регулировать экспрессию генов или же приводить к геномной нестабильности [2]. Метод Red-C [3] позволяет определить как опосредованные белком взаимодействия РНК с ДНК, так и прямые взаимодействия (но с меньшей эффективностью). Основываясь на этих данных мы попытались определить РНК, образующие R-петли. С помощью построения выравниваний (FASTA алгоритм) между последовательностями РНК и ДНК-локусами, с которыми соответствующая РНК контактирует, и проведения статистических тестов были выявлены РНК, образующие гетеродуплексы. Из 47 типов РНК лишь 8 образовывали гетеродуплексы, а Z-тест показал, что отношение гетеродуплексообразующих мРНК и транскрибируемых необработанных псевдогенов (ТНП) ко всем гетеродуплексообразующим РНК значимо больше, чем отношение всех представителей соответствующего типа РНК ко всем РНК из разметки ($p = 0.01$). Это может значить, что мРНК и ТНП более склонны образовывать гетеродуплексы, чем другие РНК.

Ключевые слова: R-петли, некодирующие РНК, хроматин.

Список литературы

1. Nishina, K., Piao, W., Yoshida-Tanaka, K. et al. DNA/RNA heteroduplex oligonucleotide for highly efficient gene silencing. *Nat Commun* 6, 7969, August 2015.
2. Piroon Jenjaroenpun, et al., R-loopDB: a database for R-loop forming sequences (RLFS) and R-loops, *Nucleic Acids Research*, Volume 45, Issue D1, January 2017, Pages D119–D127.
3. Alexey A Gavrillov, et al., Studying RNA–DNA interactome by Red-C identifies noncoding RNAs associated with various chromatin types and reveals transcription dynamics, *Nucleic Acids Research*, Volume 48, Issue 12, 09 July 2020, Pages 6699–6714.

Анализ роли локальной вторичной структурированности у некодирующих РНК в их формировании РНК-хроматинового интерактома

Богомаз О. Д.¹, Рябых Г. К.^{1,2}, Миронов А. А.^{1,2}

¹ Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова, Факультет

биоинженерии и биоинформатики, Москва, Россия

² Институт Проблем Передачи Информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия

olesjabogomaz@yandex.ru

Аннотация. Установлена связь между локальной вторичной структурированностью некоторых некодирующих РНК, рассчитанной на основе свободных энергий взаимодействий нуклеотидов при помощи RNASurface [1], и количеством контактов, которые их локальные участки образуют с хроматином.

Ключевые слова: РНК-ДНК взаимодействия, хроматин, вторичная структура РНК.

Группа некодирующих РНК (нкРНК) включает в себя все клеточные РНК, кроме белок-кодирующих. Помимо давно описанных рибосомальных и транспортных РНК, группа нкРНК включает в себя микро-, малые интерферирующие, малые ядерные, длинные некодирующие и другие РНК. К длинным некодирующим РНК относятся все нкРНК длиной свыше 200 нуклеотидов. Известно, что нкРНК вовлечены в регуляцию экспрессии генов [2, 3].

Часть нкРНК обладает стабильной вторичной структурой. К настоящему моменту изучена вторичная структура небольшого количества нкРНК. К ним, например, относятся Xist, инактивирующая одну из двух X-хромосом в клетках млекопитающих [4], SRA, участвующая в ядерной коактивации стероидных рецепторов [5], и Neat1, вовлеченная в регуляцию транскрипции посредством взаимодействия с хроматином в области параспекул [6]. Еще меньше изучена функциональная роль вторичных структур нкРНК [7].

В данной работе, опираясь на РНК-хроматиновые данные Red-C [8], мы определили связь между локальной вторичной структурированностью РНК и количеством контактов той или иной части РНК с хроматином в клетках K562. Была рассчитана корреляция Спирмена между локальной вторичной структурированностью РНК (рассчитанной на основе свободных энергий взаимодействий нуклеотидов при помощи RNASurface [1]) и количеством контактов соответствующих локальных участков РНК с хроматином.

Из 5604 РНК (все РНК из эксперимента с количеством контактов больше 1000), включенных в анализ, только 20 продемонстрировали высокую корреляцию между вторичной структурой и частотой контактов ($|corr| > 0,1$, $pval < 0,05$), причем среди них доминируют мРНК с невысоким хроматиновым потенциалом (z -score количества контактов выше 2).

Ссылки

1. Soldatov R. A, Vinogradova S. V., Mironov A. A., RNASurface: fast and accurate detection of locally optimal potentially structured RNA segments, *Bioinformatics*, Vol. 30, Is. 4, 2014, Pages 457–463, <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btt701>
2. Mercer, T., Dinger, M. & Mattick, J. Long non-coding RNAs: insights into functions. *Nat Rev Genet* 10, 155–159, 2009. <https://doi.org/10.1038/nrg2521>
3. Eddy, Sean R. Non-coding RNA genes and the modern RNA world. *Nat Rev Genet*, 2(12), 2001, 919–929. doi:10.1038/35103511
4. Pintacuda G, Young N. A., Cerase A. Function by Structure: Spotlights on Xist Long Non-coding RNA. *Front. Mol. Biosci.*, 2017 <https://doi.org/10.3389/fmolb.2017.00090>
5. Novikova I. V., Hennelly S. P., Sanbonmatsu K.Y., Structural architecture of the human long non-coding RNA, steroid receptor RNA activator, *Nucleic Acids Research*, 40(11), 2012, Pages 5034–5051, <https://doi.org/10.1093/nar/gks071>
6. Lin Y., Schmidt B. F., Bruchez M. P., McManus C. J., Structural analyses of NEAT1 lncRNAs suggest long-range RNA interactions that may contribute to paraspeckle architecture, *Nucleic Acids Research*, 46(7), 2018, Pages 3742–3752, <https://doi.org/10.1093/nar/gky046>
7. Zampetaki A., Albrecht A., Steinhofel K. Long Non-coding RNA Structure and Function: Is There a Link? *Front. Physiol.* 9:1201, 2018.
8. Gavrilov A.A., Zharikova A.A., Galitsyna A.A., Luzhin A.V., Rubanova N.M., Golov A.K., Petrova N.V., Logacheva M.D., Kantidze O.L., Ulianov S.V., Magnitov M.D., Mironov A.A., Razin S.V.. Studying RNA-DNA interactome by Red-C identifies noncoding RNAs associated with various chromatin types and reveals transcription dynamics. *Nucleic Acids Res.* 48 (12), 2020, Pages 6699–6714.

Сравнительный анализ данных РНК-белковых и РНК-хроматиновых взаимодействий на примере данных fRIP-Seq

Хлебников Д.А.¹ и Миронов А.А.^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Факультет биоинженерии и биоинформатики, Москва, Россия

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук (ИППИ РАН), Москва, Россия
dkhlebn@gmail.com

Abstract.

Работа посвящена определению РНК-ДНК контактов, опосредованных одним из исследуемых белков-регуляторов хроматина, для каждого из набора 19 ассоциированных с хроматин-ассоциированными РНК белков, при использовании данных по РНК-хроматиновым взаимодействиям эксперимента Red-C и данных по РНК-белковым взаимодействиям эксперимента fRIP-Seq. Полученные триады взаимодействий РНК-белок-ДНК были проанализированы в контексте их биологической локализации относительно регуляторных элементов генома.

Некодирующие РНК принимают участие во многих процессах в клеточном ядре, включая регуляцию транскрипции генов. Взаимодействие РНК с ДНК чаще всего опосредуется некоторым белком. В настоящее время существует множество лабораторных методов по выделению фракций РНК, взаимодействующих с макромолекулами белков или ДНК [1-5], найдены многие некодирующие РНК, которые достоверно участвуют в регуляторных процессах (MALAT1, NEAT1, XIST) [6]. В данной работе были проанализированы результаты эксперимента fRIP-Seq [4], определяющего РНК-белковые контакты для 24 белков-регуляторов хроматина, и полногеномного метода Red-C [5], определяющего РНК-ДНК контакты.

Данные секвенирования результатов fRIP-Seq для клеток линии K562 были получены из соответствующего репозитория БД NCBI GEO (ID: GSE67963), данные Red-C (также для клеток линии K562) получены в виде таблицы контактов. Картирование данных fRIP-Seq было проведено на геном человека (GRCh38.p13). Аннотирование данных на версию разметки человеческого генома Gencode Human Release 37. Был применён алгоритм нахождения статистически значимого значения порога хроматинового потенциала для ассоциированности РНК с хроматином, значения порога сигнала контакта РНК-белок для взаимодействия [7].

В процессе работы создан программный конвейер, позволяющий рассчитать сигналы контактов экспериментов, а также найти комплексы опосредованных

белком РНК-ДНК взаимодействий. Результаты проведённых тестов предполагают ассоциированность 19 исследуемых белков с РНК, достоверно ассоциированных с хроматином (saRNA). Исследованы пересечения групп saRNA, контактирующих с каждым из белков, возможность кластеризации и коррелированность saRNA по интенсивности контакта с белками. Проведено сравнение троек взаимодействия, полученных из данных по каунтам сырых ридов и из РНК-белкового пик-коллинга. Исследован биологический смысл взаимодействия РНК-ДНК, опосредованного одним из исследованных белков, лежащий в локализации ДНК-части контакта относительно регуляторных областей генома, определённых по окраске хроматина ChromHMM [8].

Автор выражает благодарность Жариковой А. А. за предоставление результатов эксперимента Red-C.

Список литературы

1. Sridhar B., Rivas-Astroza M., Nguyen T.C., Chen W. et al.: Systematic Mapping of RNA-Chromatin Interactions In Vivo. *Curr Biol* (2017) 27:602-609.
2. Li X., Zhou B., Chen L., Gou L.T. et al.: GRID-seq reveals the global RNA-chromatin interactome. *Nat Biotechnol* (2017) 35:940-950.
3. Bonetti A., Agostini F., Suzuki A.M., Hashimoto K. et al.: RADICL-seq identifies general and cell type-specific principles of genome-wide RNA-chromatin interactions. *Nat Commun* (2020)11:1018-1018.
4. G Hendrickson, D., Kelley, D.R., Tenen, D. et al. Widespread RNA binding by chromatin-associated proteins. *Genome Biol* 17, 28 (2016).
5. Alexey A Gavrilov, Anastasiya A Zharikova, Aleksandra A Galitsyna, Artem V Luzhin, Natalia M Rubanova, Arkadiy K Golov, Nadezhda V Petrova, Maria D Logacheva, Omar L Kantidze, Sergey V Ulianov, Mikhail D Magnitov, Andrey A Mironov, Sergey V Razin, Studying RNA–DNA interactome by Red-C identifies noncoding RNAs associated with various chromatin types and reveals transcription dynamics, *Nucleic Acids Research*, Volume 48, Issue 12, 09 July 2020.
6. Zhang P, Wu W, Chen Q, Chen M. Non-Coding RNAs and their Integrated Networks. *J Integr Bioinform.* 2019;16(3):20190027.
7. Mironov AA, Threshold selection using rank statistics, *Proceedings of the Fifth International Conference on Bioinformatics of Genome Regulation and Structure*, 2006.
8. Ernst J, Kellis M. ChromHMM: automating chromatin-state discovery and characterization. *Nature Methods*, 9:215-216, 2012.

On elongated chromatin loops characterized by transcriptional differences in *D. discoideum*

I. Zhegalova^{1,2,3}, S. Ulianov^{4,5}, A. Galitsyna^{1,3,4}, E. Khrameeva¹,
M. Gelfand^{1,3}

¹ Skolkovo Institute of Science and Technology, Nobelya str. 3, Moskva, 121205, Russia

² Faculty of Bioengineering and Bioinformatics, Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

³ A.A. Kharkevich Institute for Information Transmission Problems, Bol'shoi Karetnyi lane 19 Moscow, 127051, Russia

⁴ Institute for Gene Biology, RAS, Moscow, Vavilova str. 34/5, 119334, Moskva, Russia

⁵ Faculty of Biology, Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

I.Zhegalova@skoltech.ru

Abstract. *Dictyostelium discoideum* is an unicellular amoeba feeding on bacteria. When nutrients are depleted, cells begin to secrete cAMP helping them to sense each other and thus to aggregate forming a multicellular fruiting body. It is known that changes in epigenetics and 3D chromatin folding occur throughout developmental cycle and it affects gene expression. This project is dedicated to chromatin and epigenetics changes in *Dictyostelium discoideum* during developmental cycle. During this study, we have detected elongated loops (called el-loops) and annotate them on chromatin maps. We have unraveled differences in gene expression between elongated and regular loop anchors, and there are also remarkable differences in levels of active histone marks, which seems to correspond to different enhancer frequency.

Keywords: chromatin, epigenetics, dictyostelium

1 Introduction

Dictyostelium discoideum is an unicellular amoeba feeding on bacteria. When nutrients are depleted, cells begin to secrete cAMP helping them to sense each other and thus to aggregate forming a multicellular fruiting body. During starvation period it feeds with autophagy, and fruiting body formation provokes some cells to altruistically become a stalk allowing spores at the top reach as far as they could in search for nutrients. This coordinated behaviour and the phenomena of multicellularity itself occur several times independently throughout evolution, and each of these cases is worth detailed study.

It is known that chromatin structure changes dramatically through developmental cycle to repress one genes and to induce the other. There are several levels

of chromatin hierarchy, starting from chromatin loops and TADs up to chromosome territories. And they all to some extent play a role in the regulation of gene expression.

In our work we would like to unravel how chromatin structure changes in *D. discoideum* to provide understanding of one on the examples of transition from unicellularity to multicellularity. This particular study is dedicated to elongated chromatin loops and their features.

2 Results & Methods

Initial goal of the study was to unravel how chromatin is compacted in *D. discoideum* and how it is linked to gene expression and, most importantly, how transition from unicellularity to multicellularity supported by chromatin structure changes. Surprisingly, we detected high similarities between Hi-C maps at different stages of developmental life cycle.

During the visual examination of chromatin in *D. discoideum* using Hiclass (Kerpedjiev et al., 2018) we noted that, apart from symmetrical loops, LASCA (Luzhin et al., 2021) also annotated asymmetrical loops, both elongated to the right and to the left (see Fig. 1 for examples, framed in black rectangles)

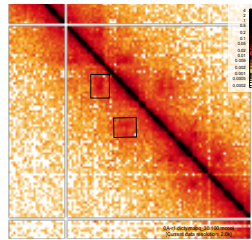


Fig. 1. View from Hiclass (Kerpedjiev et al., 2018) with elongated loops framed in black rectangles

To separate these elongated loops (el-loops for short) from existing annotation made by LASCA, we developed a simple algorithm based on fold changes in the 3' anchor flame comparing to the 5' anchor flame. Cut-offs was chosen based on 20% and 80% percentiles of fold-change distribution accordingly.

To make sure our algorithm worked properly, we plotted average loops using coolpuppy (Flyamer et al., 2020), and it seems that we successfully separated left and right el-loops (Fig. 2). It is interesting to note that these el-loops are stable between stages of development and also during cell cycle. Final lists of el-loops contain 550 loops in average for each timepoint.

In order to perform a comparative analysis of dot features, we separated whole set of loops annotated by LASCA into three categories: 1. regular loops with no assymetry in signal enrichment; 2. left el-loops - el-dots with 5' flame; 3. right el-loops - el-loops with 3' flame. Then, we checked whether gene density corresponds

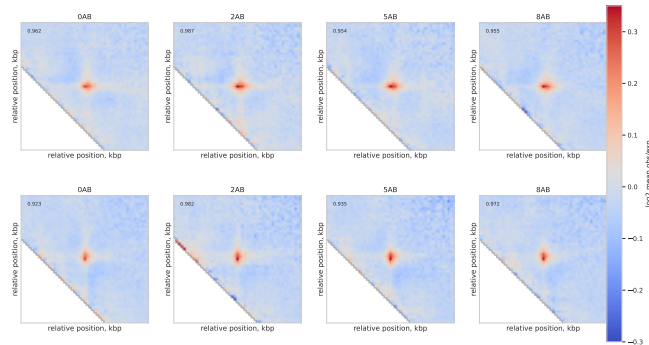


Fig. 2.

to the formation of el-loops. We found out there is the same asymmetry for genes from Watson and Crick chains regardless of what type of loops we study.

Annotation of enhancers was also carried out by crossing the ATAC-seq, ChIP-seq H3K4me1 and H3K27ac peaks, and then the fraction of the base of the loops containing enhancers was calculated in comparison with the permutation test - about 30% of the bases contain enhancers, which has statistical significance $p < 0.001$ (Fig. 3).

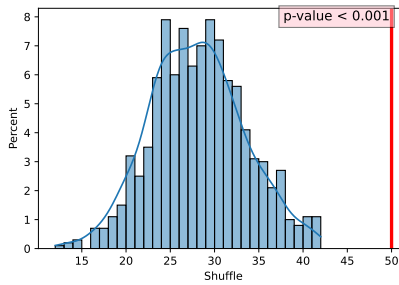


Fig. 3.

Further, we shifted our focus to RNA-seq from recent paper (Wang et al., 2021). Using deeptools (Ramírez et al., 2016), we computed pileups for RNA-seq in relation to loop anchors. These results allow us to notice depletion in RNA-seq signal (Fig. 4) in 5' anchor for left el-loops and in 3' anchor for right el-loops accordingly as compared to symmetrical signal in both anchors for "regular" loops.

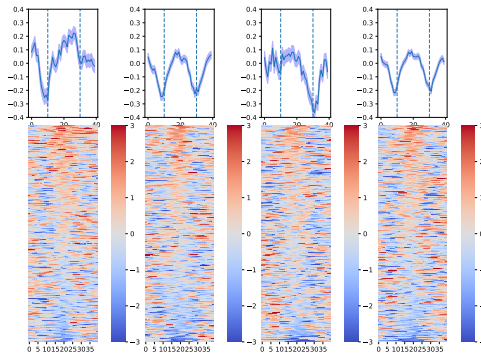


Fig. 4.

We also checked whether el-loops linked to replication origin locations. There is almost no annotation of replication origin in *Dictyostelium* from the literature, so we decided to look on cis- and trans-contact coverage obtained from Hi-C maps along the dot position to check whether there is an enrichment, which can be a sign on replication origins located at the el-loops anchors. Apparently, there is not enough evidence to support this hypothesis from the pileup plot analysis.

3 Conclusions

During this study, we detected elongated loops in chromatin maps and find out they have asymmetry in levels of gene expression between dot anchors, while active histone marks levels remain almost equal in comparison between dot anchors. El-loops are stable in life cycle and are also visible at different stages of cell cycle. Apparently, they are not linked to replication, gene length or differences in gene occurrence.

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR, project number 20-34-90058

References

- Flyamer, I.M., Illingworth, R.S. and Bickmore, W.A.: Coolpup. py: versatile pile-up analysis of Hi-C data. *Bioinformatics*, 36(10):2980-2985 (2020)
- Kerpedjiev, P., et al.: HiGlass: Web-based visual comparison and exploration of genome interaction maps. *Genome Biology*, 19:125 (2018)
- Luzhin, A.V., Golov, A.K., Gavrillov, A.A., Velichko, A.K., Ulianov, S.V., Razin, S.V. and Kantidze, O.L.: LASCA: loop and significant contact annotation pipeline. *Scientific reports*, 11(1):1-9 (2021)
- Ramírez, F., et al., deepTools2: a next generation web server for deep-sequencing data analysis. *Nucleic acids research*, 44(W1):W160-W165 (2016)
- Wang, S.Y., et al. Role of epigenetics in unicellular to multicellular transition in *Dictyostelium*. *Genome biology*, 22(1):1-30 (2021)

Ассоциация редких вариантов с фенотипом некомпактного миокарда левого желудочка в российской популяции

М. Зайченко¹, В. Е. Раменский^{2,3}, А. А. Жарикова^{2,3}, Ю. В. Вяткин^{2,4},
А. В. Киселева², А. И. Ершова², Е. А. Сотникова², М. Г. Дивашук^{2,5}, О. В.
Курилова², О. П. Скирко², Г. А. Муромцева², О. А. Белова⁶, С. А.
Рачкова⁶, М. С. Покровская², С. А. Шальнова², О.В. Куликова², Р.П.
Мясников², О. М. Драпкина² и А. Н. Мешков²

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

² ФГБУ "Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины" Минздрава России

³ Факультет биоинженерии и биоинформатики, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

⁴ Новосибирский государственный университет

⁵ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии

⁶ ОБУЗ Кардиологический диспансер г. Иваново

Аннотация Сердечно-сосудистые заболевания являются лидирующей причиной смерти в России. Некомпактный миокард левого желудочка (НМЛЖ) является генетическим заболеванием, проявляющимся аномальным развитием левого желудочка сердца. НМЛЖ является аутосомно-доминантным заболеванием и вызывается редкими мутациями в ряде генов. Так как стандартные методы поиска ассоциаций неприменимы к редким вариантам, необходимо использовать методы, разработанные специально для поиска ассоциаций различных фенотипов с редкими вариантами. Целью данной работы был поиск ассоциаций редких вариантов в 189 генах с фенотипом НМЛЖ среди представителей российской популяции. Для этого была собрана выборка из 1685 контролей из Ивановской области и 172 пациентов НМИЦ Терапии и профилактической медицины с НМЛЖ. В каждом из 189 генов с помощью 3 различных методов – SKAT, SKAT-O и нагрузочных тестов – был произведен поиск ассоциаций редких вариантов с фенотипом НМЛЖ. В результате работы были показаны ассоциации фенотипа НМЛЖ с редкими вариантами в генах *MUN7*, *TTN*, *DSG2* и *NEBL*.

Ключевые слова: Редкие варианты, некомпактный миокард левого желудочка, российская популяция.

1 Введение

Сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной смертности на территории Российской Федерации [1]. Зачастую, развитие сердечно-сосудистых заболеваний у человека обусловлены не только стилем жизни, но и генетическими факторами риска.

Некомпактный миокард левого желудочка (НМЛЖ) является редкой аутосомно-доминантной формой некомпактной кардиомиопатии. Данное заболевание характеризуется аномальным развитием левого желудочка сердца, вследствие чего в левом желудочке значительно увеличивается число трабекул и межтрабекулярных пространств, что препятствует нормальному функционированию сердечной мышцы [2]. НМЛЖ может быть вызвано редкими мутациями в более чем 20 генах [3].

Известно, что болезнетворные мутации зачастую редки в популяции, поэтому поиск ассоциаций с помощью, например, GWAS, к ним не применим. Для решения данной проблемы были разработаны методы поиска ассоциаций фенотипов и редких вариантов, основной идеей которых является агрегация редких вариантов для установления ассоциации [4].

Целью данной работы было произвести поиск ассоциаций редких вариантов в 189 генах в российской популяции с фенотипом НМЛЖ.

Исследование выполнено в соответствии со стандартами надлежащей клинической практики (Good Clinical Practice) и принципами Хельсинкской декларации. Протокол исследования одобрен этическим комитетом НМИЦ ТПМ (протокол номер 07-03/12 от 03.07.2012).

2 Материалы и методы

2.1 Описание образцов

В качестве контрольной выборки были использованы участники исследования “Эпидемиология сердечно-сосудистых заболеваний и их факторов риска в регионах Российской Федерации” (ЭССЕ-РФ) по Ивановской области [5]. Всего в выборке присутствовало 1685 образца. В выборке присутствовали 1056 женщины, медианный возраст которых равнялся 52 годам на момент участия в исследовании и 609 мужчин, медианный возраст которых равнялся 44 годам.

Для исследования НМЛЖ были отобраны 172 пациента с НМЛЖ, стоящих на учете в НМИЦ ТПМ. В выборке присутствовали 81 женщина, медианный возраст которых равнялся 43 годам (на момент участия в исследовании) и 91 мужчин, медианный возраст которых равнялся 42 годам.

2.2 Отбор генов для исследования

Для поиска ассоциаций редких вариантов с фенотипом НМЛЖ был составлен список генов по данным в литературе и в релевантных базах данных - HPO, OMIM. В список вошли гены, про которые известно, что они

ассоциированы с НМЛЖ и другими типами кардиомиопатий. Всего список включал 189 генов, находящихся на аутосомных хромосомах - *AARS2*, *ABCC6*, *ABCC9*, *ACAD9*, *ACADVL*, *ACTA1*, *ACTA2*, *ACTC1*, *ACTN2*, *AGK*, *AGL*, *AGPAT2*, *ALMS1*, *AMPD1*, *ANG*, *ANK2*, *ANKRD1*, *ARFGEF2*, *ATP5E*, *ATPAF2*, *BAG3*, *BRAF*, *BSCL2*, *CACNA1C*, *CALR3*, *CASQ2*, *CAV3*, *CBL*, *CITED2*, *CNBP*, *COA5*, *COQ2*, *COX15*, *COX6B1*, *CRELD1*, *CRYAB*, *CSRP3*, *CTF1*, *CTNNA3*, *DES*, *DLG*, *DMPK*, *DNAJC19*, *DNM1L*, *DOLK*, *DSC2*, *DSG2*, *DSP*, *DTNA*, *ELN*, *EYA1*, *EYA4*, *FAH*, *FBN2*, *FHL2*, *FHOD3*, *FKRP*, *FKTN*, *FLNC*, *FLT1*, *FOXD4*, *FOXRED1*, *FXN*, *GAA*, *GATA4*, *GATA6*, *GATAD1*, *GBE1*, *GFM1*, *GJA1*, *GJA5*, *GLB1*, *GNPTAB*, *GUSB*, *HADHB*, *HBB*, *HCN4*, *HFE*, *HMGCL*, *HRAS*, *ILK*, *ITGA7*, *JAG1*, *JPH2*, *JUP*, *KCNE1*, *KCNE2*, *KCNH2*, *KCNJ2*, *KCNJ8*, *KCNQ1*, *KLF10*, *KRAS*, *LAMA2*, *LAMA4*, *LDB3*, *LIAS*, *LMNA*, *MAP2K1*, *MAP2K2*, *MEF2A*, *MIB1*, *MLYCD*, *MMACHC*, *MRPL3*, *MRPS22*, *MTMR14*, *MTO1*, *MURC*, *MYBPC3*, *MYH11*, *MYH6*, *MYH7*, *MYH7B*, *MYL2*, *MYL3*, *MYLK2*, *MYOM1*, *MYOT*, *MYOZ2*, *MYPN*, *NEBL*, *NEXN*, *NF1*, *NKX2-5*, *NNT*, *NOTCH1*, *NRAS*, *OBSL1*, *PDLIM3*, *PITX2*, *PKP2*, *PLEC*, *PLEKHM2*, *PLN*, *PMM2*, *PMP22*, *PRDM16*, *PRKAG2*, *PRKAR1A*, *PSEN1*, *PSEN2*, *PTPN11*, *RAF1*, *RBM20*, *RYR1*, *RYR2*, *SCN1B*, *SCN5A*, *SCO2*, *SDHA*, *SDHD*, *SGCA*, *SGCB*, *SGCD*, *SHOC2*, *SIX1*, *SIX5*, *SLC22A5*, *SLC25A3*, *SLC25A4*, *SMAD3*, *SOS1*, *SOS2*, *SPRED1*, *SURF1*, *SYNE1*, *SYNE2*, *TBX1*, *TBX20*, *TBX5*, *TCAP*, *TFAP2A*, *TGFB3*, *TMEM43*, *TMEM70*, *TMPO*, *TNNC1*, *TNNI3*, *TNNT2*, *TNNT3*, *TPM1*, *TRIM63*, *TFSM*, *TTN*, *TTR*, *TXNRD2*, *VCL*, *YWHAE*.

2.3 Секвенирование

Секвенирование участников ЭССЕ-РФ из Ивановской области было проведено с использованием таргетной панели, содержащей 242 гена, ассоциированных с различными сердечно-сосудистыми заболеваниями. Секвенирование производилось на платформе Illumina NextSeq 550.

Секвенирование пациентов с НМЛЖ проводилось с использованием различных таргетов: панели на 242 гена, двух экзомных наборов, а также полногеномного секвенирования (Таблица 1). Для объединения результатов полногеномного и таргетного секвенирования на 58 образцах, секвенированных обоими способами, была разработана процедура объединения и гармонизации данных.

2.4 Обработка данных секвенирования

Обработка данных секвенирования, произведенного в НМИЦ ТПМ, производилась с помощью программного конвейера, основанного на GATK 3.8 согласно лучшим практикам Broad Institute для коллинга вариантов с помощью жёстких фильтров и VQSR [6]. Все варианты, прошедшие фильтры,

Таблица 1. Таргеты и платформы, на которых были секвенированы пациенты с НМЛЖ.

Таргет	Кол-во пациентов, секвенированных на данном таргете	Кол-во пациентов, включенных в дальнейший анализ	Платформа секвенирования
Таргетная панель на 242 гена	60	60	Illumina NextSeq 550 (НМИЦ ТПМ)
TruSeq exome	20	20	Illumina NextSeq 550 (НМИЦ ТПМ)
SeqCap экзом	8	8	Illumina HiSeq 1500 (НМИЦ ТПМ)
Полногеномное секвенирование	142	84	Illumina NovaSeq 6000 (ЦСП ФМБА)
Всего	172 пациента		

аннотировались с помощью ENSEMBL VEP. Каждому варианту присваивались информация о его типе (несинонимичный вариант, индел), идентификатор из базы dbSNP, информация о каноническом транскрипте. Данные базы dbNSFP были использованы, чтобы предсказать патогенность миссенс-вариантов с помощью пяти методов - SIFT, PolyPhen-2, MetaLR, MetaSVM, REVEL. Также для каждого варианта присутствовала информация об аллельных копиях (AC), аллельной частоте (AF) и носителях вариантов.

При полногеномном и таргетном секвенировании (Таблица 1) использовались различные версии референсного генома и различные протоколы обработки данных. В частности, при полногеномном секвенировании отсутствовала фильтрация вариантов низкого качества. Для дальнейшей работы был составлен таргет из экзонов 189 целевых генов в сборке hg19. Был произведен его перевод в hg38 для работы с геномными данными, геномные данные были урезаны по данному таргету и затем с помощью Picard LiftoverVcf переведены в hg19 сборку генома.

Затем для 58 образцов, секвенированных дважды, с помощью библиотеки Nail была произведена проверка совпадения генотипов при различных значениях порога качества вариантов и индивидуальных генотипов. При этом ставилась задача обеспечить максимальное совпадение вариантов и индивидуальных генотипов при максимальном сохранении данных.

На первом этапе был выполнен подбор порога качества вариантов для полногеномных данных, так как использованный конвейер обработки не включал фильтрацию вариантов. Изначально, в 58 образцах присутствовало 2636 общих вариантов с AC > 0. Для геномных данных были исследованы пороги качества вариантов, равные 0, 50, 60, 70, 80 и 90. Наилучшее совпадение генотипов (98.75%) было достигнуто при пороге качества вариантов, равном 70. Такой порог оставил 2612 общих варианта в 58 образцах. Далее,

после ряда тестов был выбран порог 10 и 20 для геномных и таргетных данных, соответственно. Подобранные таким образом фильтры оставили 2420 общих вариантов в 58 образцах и были применены к полным выборкам образцов.

Для подтверждения отсутствия систематических различий между двумя наборами данных было решено произвести анализ основных компонент (РСА) на всех доступных полногеномных данных (709 образцов, включающих не только пациентов с НМЛЖ) и 1773 контролей и пациентов с НМЛЖ (Рисунок 1). Для анализа использовались варианты, присутствующие в обоих наборах данных, с частотой редкого аллеля $MAF > 5\%$. Была произведена фильтрация вариантов на основе неравновесного сцепления генов с помощью библиотеки Nail. Так как значимых отличий между данными обнаружено не было, данные были далее объединены в единый набор. Для 58 образцов, секвенированных дважды, было решено использовать результаты таргетного секвенирования, так как они имеют большую глубину покрытия.

2.5 Поиск ассоциаций фенотипа НМЛЖ с редкими вариантами

В качестве выборки был использован набор из 1685 контролей из Ивановской области и 172 пациентов с НМЛЖ, всего 1857 образца.

Для поиска ассоциаций редких вариантов и фенотипа все варианты в том или ином гене объединялись в группы согласно их частоте и типам. Пороги по частоте формировали следующие группы:

- Новые варианты (отсутствующие в базе dbSNP). В данном наборе у таких вариантов AC не превышал 10;
- Варианты с $MAF < 0.5\%$, что соответствовало $AC < 18$;
- Варианты с $MAF < 1\%$, что соответствовало $AC < 37$;
- Варианты с $MAF < 5\%$, что соответствовало $AC < 185$.

При создании групп по типам вариантов были использованы следующие определения:

- Укорачивающие белок варианты;
- Укорачивающие белок варианты и миссенс-варианты, предсказанные при аннотации как патогенные хотя бы одним методом;
- Укорачивающие белок варианты и миссенс-варианты, предсказанные при аннотации как патогенные хотя бы тремя методами;
- Укорачивающие белок варианты и миссенс-варианты, предсказанные при аннотации как патогенные всеми пятью методом;
- Укорачивающие белок варианты, миссенс-варианты и инделы;
- mis: миссенс-варианты;
- mis3: миссенс-варианты, предсказанные как патогенные хотя бы тремя методом при аннотации;
- mis5: миссенс-варианты, предсказанные как патогенные всеми пятью методом при аннотации.

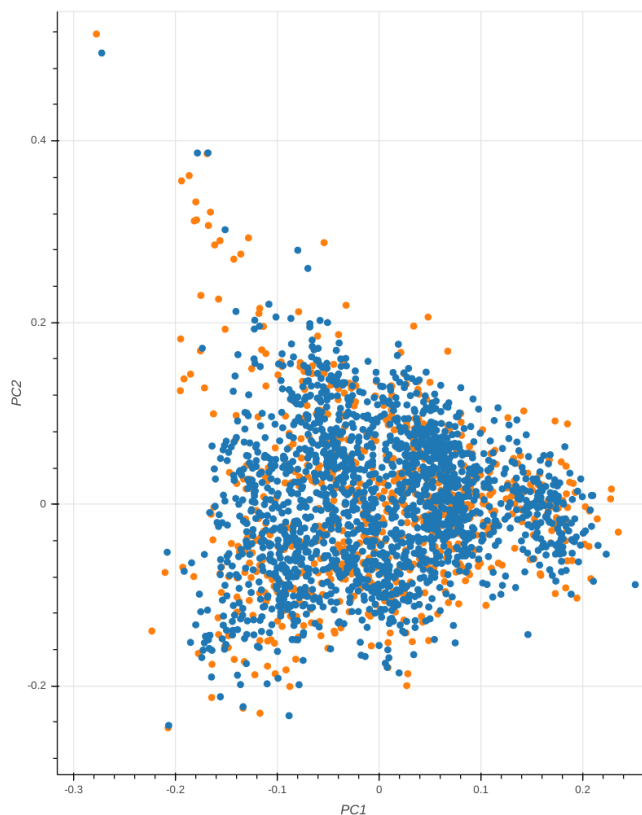


Рис. 1. PCA для сравнения данных из полногеномного (оранжевые точки) и таргетного секвенирования (голубые).

В качестве ковариат были использованы пол и возраст.

Для каждой группы было проведено 6 теста - SKAT, SKAT-O и нагрузочные тесты, каждый тест с ковариатами и без. Для проведения тестов был создан конвейер обработки vcf файлов на основе vcftools, библиотеки pandas (Python 3.7.4) и библиотеки SKAT (R 4.1.3).

3 Результаты

Была обнаружена ассоциация фенотипа с редкими вариантами в гене *MUN7*, которая подтвердила уже известную связь мутаций в этом гене с НМЛЖ. Наилучший результат был достигнут при нагрузочном тесте с учетом ковариат ($p\text{-value} = 3 \cdot 10^{-10}$). Группа редких вариантов содержала 26 вариантов *mis5*. Два варианта - rs121913650 и rs121913624 - в базе данных

ClinVar помечены как патогенные. Все варианты были найдены или только в пациентах с НМЛЖ, или только в контролях. Восемь вариантов из 26 в ходе консультирования пациентов были вынесены в заключение как потенциально каузальные. При исключении этих вариантов из набора, p-value понизился, однако ассоциация осталась значимой - p-value равнялся $9 \cdot 10^{-4}$. Детальную информацию о вариантах можно найти в Таблице 2.

Таблица 2. Редкие варианты в гене *MYH7*, для которых была показана ассоциация с НМЛЖ. Указана клиническая значимость варианта в базе ClinVar: Pathogenic - патогенный вариант, Conflict - вариант с конфликтующими интерпретациями патогенности, VUS - вариант неизвестной клинической значимости. Не указана - вариант не описан в базе.

Вариант	rsID	Тип варианта	АС	Клиническая значимость (ClinVar)
chr14:23884618_T/C	rs730880813	Миссенс-вариант	1	VUS
chr14:23884861_G/A	rs121913650	Миссенс-вариант	1	Pathogenic
chr14:23885272_C/T	rs565663412	Миссенс-вариант	2	VUS
chr14:23888450_C/T	rs727505325	Миссенс-вариант	1	VUS
chr14:23890217_C/A	rs45478699	Миссенс-вариант	3	VUS
chr14:23891399_G/A	rs192722540	Миссенс-вариант	1	Conflict
chr14:23892899_C/G	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	Не указана
chr14:23892910_A/G	rs145532615	Миссенс-вариант	4	Benign
chr14:23893148_C/G	rs45496496	Миссенс-вариант	1	Conflict
chr14:23893175_C/T	rs886039204	Миссенс-вариант	1	Conflict
chr14:23894202_G/A	rs1064793206	Миссенс-вариант	1	Conflict
chr14:23894584_C/T	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	Не указана
chr14:23897042_G/T	rs876657878	Миссенс-вариант	1	VUS
chr14:23897798_C/T	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	Не указана
chr14:23898487_C/T	rs121913624	Миссенс-вариант	1	Pathogenic
chr14:23898506_T/G	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	Не указана
chr14:23899017_G/C	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	Не указана
chr14:23899073_T/C	rs876661150	Миссенс-вариант	1	VUS
chr14:23899850_G/C	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	Не указана
chr14:23900798_C/T	rs267606910	Миссенс-вариант	1	Conflict
chr14:23900799_G/T	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	Не указана
chr14:23900824_C/G	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	Не указана
chr14:23900882_G/A	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	VUS
chr14:23901077_C/T	rs730880156	Миссенс-вариант	1	VUS
chr14:23901955_G/A	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	Не указана
chr14:23902893_G/A	rs45511396	Миссенс-вариант	1	VUS

Ген *MYH7* известен как вызывающий различные типы кардиомиопатий. Ген кодирует тяжелую цепь β -миозина, поэтому мутации в гене могут влиять на актин-миозиновые взаимодействия [7].

Была также подтверждена известная ассоциация гена *TTN* и НМЛЖ для 16 редких белок-укорачивающих вариантов с $MAF < 0.5\%$. Ген *TTN* кодирует белок титин, являющийся компонентом саркомер в сердце. Мутации в гене могут привести к нарушениям функций саркомер, а также изменению их размера и взаимного расположения [8]. Наилучший результат был достигнут методом SKAT без ковариат ($p\text{-value} = 2 \cdot 10^{-4}$). Набор содержал 3 варианта (rs727505319, rs1471414348, rs775072385) которые были вынесены в заключение как потенциально каузальные. Четыре варианта были аннотированы как патогенные, согласно данным базы ClinVar. При исключении потенциально каузальных вариантов из группы не было показано значимой ассоциации ($p\text{-value}=0.06$). Детальная информация о вариантах представлена в Таблице 3.

Таблица 3. Редкие варианты в гене *TTN*, показавшие ассоциацию с фенотипом НМЛЖ. Pathogenic - Патогенный вариант, VUS - вариант неизвестной клинической значимости, Не указана - вариант не описан в базе.

Вариант	rsID	Тип варианта	АС	Клиническая значимость (ClinVar)
chr2:179391864_C/T/C	Новый вариант	Вариант со сдвигом рамки считывания	1	Не указана
chr2:179406990_C/G	rs727505319	Сплайс-донор вариант	1	Pathogenic
chr2:179412221_C/A	Новый вариант	Новый стоп-кодон	1	Не указана
chr2:179418687_AC/A	Новый вариант	Вариант со сдвигом рамки считывания	1	Не указана
chr2:179429208_C/T	Новый вариант	Новый стоп-кодон	1	Не указана
chr2:179436920_G/A	Новый вариант	Новый стоп-кодон	1	Не указана
chr2:179439829_GT/G	Новый вариант	Вариант со сдвигом рамки считывания	1	Не указана
chr2:179444577_T/C	Новый вариант	Сплайс-акцентор вариант	1	Не указана
chr2:179446316_G/A	Новый вариант	Новый стоп-кодон	1	Не указана
chr2:179458065_G/A	rs1553649171	Новый стоп-кодон	1	Pathogenic
chr2:179477578_G/A	rs1471414348	Новый стоп-кодон	1	Pathogenic
chr2:179569673_-CCTCT/C	rs777924443	Вариант со сдвигом рамки считывания	1	Pathogenic
chr2:179588868_G/A	rs576359448	Новый стоп-кодон	1	VUS
chr2:179598174_G/T	Новый вариант	Новый стоп-кодон	1	Не указана
chr2:179604264_G/A	rs775072385	Новый стоп-кодон	2	VUS
chr2:179642563_G/A	Новый вариант	Новый стоп-кодон	1	Не указана

Была показана ассоциация 3 белок-укорачивающих вариантов и 5 *mis3* в гене *DSG2* с НМЛЖ. Ген *DSG2* кодирует десмоглеин 2, участвующий в формировании десмосом [9]. MAF вариантов не превышала 1%. Наилучший

результат был показан в нагрузочном тесте без ковариат ($p\text{-value} = 2 \cdot 10^{-3}$). Все варианты в ClinVar были аннотированы как варианты с конфликтующими интерпретациями патогенности или варианты неизвестной значимости. Вариант rs751527714 был отмечен как потенциально каузальный у одного из пациентов. Его исключение из набора привело к ухудшению результата, однако ассоциация оставалась значимой (нагрузочный тест, $p\text{-value} = 3 \cdot 10^{-3}$). Информация о вариантах в наборе представлена в Таблице 4.

Таблица 4. Редкие варианты в гене *DSG2*, показавшие ассоциацию с фенотипом НМЛЖ. Conflict - вариант с конфликтующими интерпретациями патогенности, VUS - вариант неизвестной клинической значимости, Не указана - вариант не описан в базе.

Вариант	rsID	Тип варианта	АС	Клиническая значимость (ClinVar)
chr18:29099850_G/A	rs121913013	Миссенс-вариант	5	Conflict
chr18:29102201_T/G	Новый вариант	Миссенс-вариант	2	Не указана
chr18:29104417_A/C	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	VUS
chr18:29104753_T/C	Новый вариант	Миссенс-вариант	1	Не указана
chr18:29111023_C/A	rs751527714	Новый стоп-кодон	1	Не указана
chr18:29121188_G/A	rs201564919	Миссенс-вариант	1	VUS
chr18:29122554_CAAGG/C	Новый вариант	Вариант со сдвигом рамки считывания	1	Не указана
chr18:29126403_AAGAG/A	rs397516706	Вариант со сдвигом рамки считывания	1	Conflict

Также была показана ассоциация 25 миссенс-вариантов ($MAF < 5\%$) в гене *NEBL*. Ген *NEBL* кодирует белок из семейства небулинов, являющихся компонентами саркомер [10]. Наилучший результат был показан методом SKAT с ковариатами ($p\text{-value} = 2 \cdot 10^{-4}$). Набор включал в себя варианты Набор вариантов включал 5 новых вариантов. Максимальное количество аллельных копий было у варианта rs4748728 - 112 копий. У 19 вариантов количество аллельных копий не превышало 10. Ни один вариант в ходе аннотации не был предсказан как патогенный более чем 3 методами. Одиннадцать вариантов были предсказаны как безвредные всеми методами.

4 Заключение

В ходе выполнения работы был разработан автоматизированный конвейер для обработки результатов секвенирования и поиска ассоциаций редких вариантов с количественными и категориальными фенотипами с помощью статистических тестов. Были созданы выборки пациентов и контролей из

российской популяции, проведен анализ результатов секвенирования 189 генов, представляющих интерес для поиска ассоциаций с редкими вариантами и фенотипом НМЛЖ. В работе были показаны ассоциации некомпактного миокарда левого желудочка с редкими вариантами различных типов в генах *MYH7*, *TTN* и *DSG2*. Также была показана возможная ассоциация редких миссенс-вариантов в гене *NEBL* с фенотипом НМЛЖ.

Список литературы

1. Боровкова Н.Ю., Токарева А.С., Савицкая Н.Н., Крисанова К.И., Курашин В.К., Одинцов Г.А. Современное состояние проблемы сердечно-сосудистых заболеваний в Нижегородском регионе: возможные пути снижения смертности. Российский кардиологический журнал. 2022;27(5):5024. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2022-5024>
2. Singh DP, Patel H. Left Ventricular Non-compaction Cardiomyopathy [Internet]. NCBI Bookshelf. 2021 [cited 2022 Jun 2]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK537025/>
3. Richard P, Ader F, Roux M, et al. Targeted panel sequencing in adult patients with left ventricular non-compaction reveals a large genetic heterogeneity. Clin Genet. 2019;95(3):356-367. doi:10.1111/cge.13484
4. Lee S, Abecasis GR, Boehnke M, Lin X. Rare-variant association analysis: study designs and statistical tests. Am J Hum Genet. 2014;95(1):5-23. doi:10.1016/j.ajhg.2014.06.009
5. Ramensky V. E., Ershova A.I., Zaichenoka M. et al. (2021) Targeted Sequencing of 242 Clinically Important Genes in the Russian Population From the Ivanovo Region. Front. Genet. 12:709419. doi: 10.3389/fgene.2021.709419
6. Gatk Team, <https://gatk.broadinstitute.org/hc/en-us/articles/360035894711-About-the-GATK-Best-Practices>
7. Villard E., Duboscq-Bidot L., Charron P. et al. Mutation screening in dilated cardiomyopathy: prominent role of the beta myosin heavy chain gene. Eur Heart J. 2005 Apr;26(8):794-803. doi: 10.1093/eurheartj/ehi193. Epub 2005 Mar 15. PMID: 15769782.
8. Li S, Zhang C, Liu N, et al. Titin-truncating variants are associated with heart failure events in patients with left ventricular non-compaction cardiomyopathy. Clin Cardiol. 2019;42(5):530-535. doi:10.1002/clc.23172
9. Cahill TJ, Ashrafian H, Watkins H. Genetic cardiomyopathies causing heart failure. Circ Res. 2013 Aug 30;113(6):660-75. doi: 10.1161/CIRCRESAHA.113.300282. PMID: 23989711.
10. Perrot A, Tomasov P, Villard E, et al. Mutations in NEBL encoding the cardiac Z-disk protein nebulin are associated with various cardiomyopathies. Arch Med Sci. 2016;12(2):263-278. doi:10.5114/aoms.2016.59250

Hourglass model in insect metamorphosis

Alexandra M Ozerova¹[10000-0002-0893-4575] and Mikhail S. Gelfand^{1,2}[10000-0003-4181-0846]

¹ Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

² Kharkevich Institute for Information Transmission Problems, Moscow, Russia
alexapogorelskaya@gmail.com

Abstract. The hourglass model of development implies diversity between closely related species to be decreased in the middle of embryogenesis while being higher during early and late stages. This so-called phylotypic period is thought to be conserved due to crucial processes occurring at this stage. Some organisms have several developmental stages when organogenesis occurs. Holometabola insects have larval tissues reorganized to form adult organs during metamorphosis, therefore the hourglass pattern could be hypothesized. We performed sequencing of *Drosophila melanogaster* and *Drosophila virilis* transcriptomes across the ontogeny to test the hypothesis and reveal the stage with maximum conservation in the pupal development. The stage of minimal diversity across *Drosophila* species was estimated to be the second and third pupae ages (2-6 hours of pupal development).

Зависимость частоты эктопической геной конверсии от взаимного расположения паралогов в мейотическом хроматине

Ольга А. Вахрушева^{1,2}, Георгий А. Базыкин^{1,2}

¹Сколковский институт науки и технологий, г. Москва 121205, Россия

²Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН), г. Москва 127051, Россия

e-mail: O.Vakhrusheva@skoltech.ru

Аннотация. Генная конверсия – это ассоциированный с рекомбинацией процесс, при котором происходит замена последовательности некоторого участка генома на последовательность гомологичного участка. Выделяют два основных типа геной конверсии – аллельную и неаллельную (эктопическую) геной конверсию. Эктопическая геной конверсия выражается в замещении геномного участка последовательностью из паралогичного локуса. Известно, что эктопическая геной конверсия значительно чаще происходит между паралогами, находящимися на одной хромосоме, по сравнению со случаем, когда паралоги находятся на разных хромосомах [1, 2]. При этом частота внутривхромосомной геной конверсии между паралогами падает с увеличением «линейного» (измеряемого в нуклеотидах) расстояния между паралогами в последовательности генома [1, 2]. Однако до настоящего момента не было известно, зависит ли вероятность эктопической геной конверсии от того, насколько часто паралогичные участки генома колокализуются в мейотическом хроматине. В данной работе мы исследуем зависимость частоты эктопической геной конверсии у *Mus musculus* от взаимного расположения паралогов в трёхмерной структуре мейотического хроматина. Для этого мы используем опубликованные ранее данные по пространственной организации мейотического хроматина, полученные для *Mus musculus* [3]. Наши предварительные результаты указывают на то, что частота, с которой паралогичные участки колокализуются в мейотическом хроматине, является значимым предиктором события эктопической геной конверсии. Это справедливо и в том случае, если при проведении анализа применяется поправка на «линейное» расстояние между паралогами в нуклеотидах.

Ключевые слова: геной конверсия, паралоги, мейоз, пространственная структура хроматина.

Ссылки

1. Goldman, A. S. & Lichten, M.: The efficiency of meiotic recombination between dispersed sequences in *Saccharomyces cerevisiae* depends upon their chromosomal location. *Genetics* 144, 43–55 (1996).
2. Benovoy, D. & Drouin, G.: Ectopic gene conversions in the human genome. *Genomics* 93, 27–32 (2009).
3. Alavattam, K. G. *et al.*: Attenuated chromatin compartmentalization in meiosis and its maturation in sperm development. *Nat Struct Mol Biol* 26, 175–184 (2019).

Консервативность неконсенсусных нуклеотидов в сайтах связывания факторов транскрипции

Е. Белоусова¹, Р. Моран-Товар², М. Лэссиг², М. Гельфанд^{1,3,4}

¹ Факультет биоинженерии и биоинформатики МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт Биологической Физики, Кёльнский университет, Кёльн, Германия

³ Центр Наук о Жизни, Сколковский институт науки и технологий, Сколково, Россия

⁴ Институт проблем передачи информации РАН, Москва, Россия
evgenia.belousova7834@gmail.com

Аннотация. Данная работа посвящена уточнению разницы в понятиях консенсусности и консервативности для сайтов связывания транскрипционных факторов, а именно – поиску консервативных неконсенсусных нуклеотидов в таких сайтах. Мы обнаружили хорошо выраженные консервативные неконсенсусные нуклеотиды в сайтах по крайней мере некоторых транскрипционных факторов, поскольку показали, что на эти неконсенсусные нуклеотиды действует отрицательный отбор. Также мы выяснили, что некоторые неконсенсусные нуклеотиды консервативнее, чем нуклеотиды в нейтрально эволюционирующих позициях генома. Затем мы показали, что неконсенсусные нуклеотиды могут не только быть консервативными, но также участвовать в поддержании веса сайтов на определенном уровне. Все эти наблюдения свидетельствуют в пользу того, что неконсенсусные нуклеотиды поддерживают энергию связывания транскрипционного фактора с сайтом на определенном уровне, а следовательно, поддерживают и определенную степень регуляции транскрипции гена данным фактором, образуя дополнительное звено регуляции транскрипции в бактериальных геномах.

Ключевые слова: Регуляция транскрипции, Сайты связывания транскрипционных факторов, Консенсус.

1 Введение

В данной работе мы рассматриваем группы ортологичных сайтов связывания транскрипционных факторов в геномах различных семейств бактерий. Принято считать, что в сайтах связывания факторов транскрипции консервативны те нуклеотиды, которые критичны для связывания фактора с сайтом, то есть консенсусные. Однако ранее коллеги в работе [1] наблюдали в сайтах из бактериальных геномов, что консервативными могут быть не только консенсусные нуклеотиды (рисунок 1). Первое возможное отклонение от консервативности исключительно консенсусных нуклеотидов (рисунок 1, слева) состоит в том, что некоторые неконсенсусные нуклеотиды тоже консервативны, а второе (рисунок 1, справа) – в

том, что в ходе эволюции сохраняется не конкретный нуклеотид, а позиция сайта, содержащая только неконсенсусные нуклеотиды.

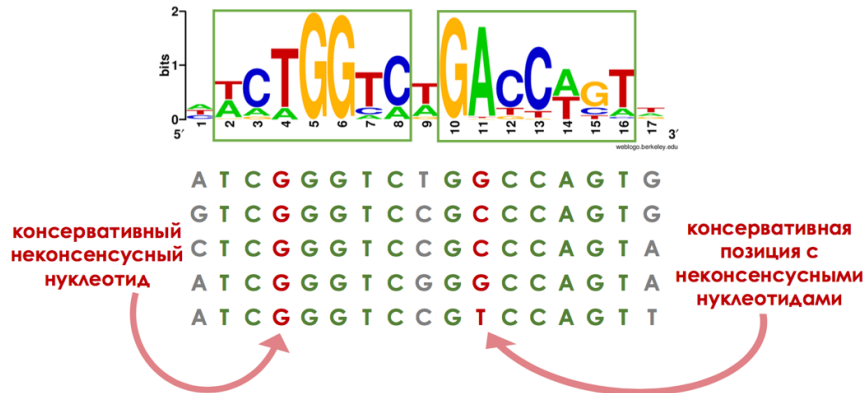


Рис. 1. Гипотетические примеры консервативности неконсенсусности. Сверху показана позиционно-весовая матрица транскрипционного фактора FadR, а под ней пример выравнивания сайтов перед одним из генов, регулируемых FadR. Позиционно-весовая матрица построена сайтам перед всеми генами, регулируемые FadR. Зеленые буквы соответствуют консенсусным нуклеотидам, красные – неконсенсусным, серые – нуклеотидам в позициях без консенсуса. Слева показана консервативность конкретного неконсенсусного нуклеотида, справа – консервативность позиции с неконсенсусными нуклеотидами.

Потенциально возможных объяснений для примера слева на рисунке 1 два: во-первых, рассматриваемые сайты могут перекрываться с еще неизвестными сайтами транскрипционных факторов, и наблюдаемые консервативные неконсенсусные нуклеотиды могут быть консенсусными для неизвестного сайта. Во-вторых, неконсенсусные нуклеотиды могут поддерживать конкретный незначительный уровень связывания фактора с сайтом (то есть, вес сайта), и, таким образом, являться дополнительным звеном в регуляции транскрипции у бактерий. Поддержание конкретной энергии связывания транскрипционного фактора с сайтом также может объяснять консервативность позиции, содержащей неконсенсусный нуклеотид.

С момента выхода работы [1] стало известно гораздо больше бактериальных геномов. Таким образом, цель данной работы состоит в том, чтобы найти хорошо выраженные неконсенсусные нуклеотиды в ортологичных сайтах связывания факторов транскрипции и сравнить их консервативность с таковой нейтрально эволюционирующих элементов.

Задачи работы:

1. Выявить паттерны отбора, действующие на неконсенсусные нуклеотиды;
2. Сравнить консервативность неконсенсусных нуклеотидов в сайтах транскрипционных факторов и консервативность нуклеотидов в синонимических позициях регулируемых генов;
3. Изучить влияние неконсенсусных нуклеотидов на вес сайтов.

2 Результаты

2.1 Выявление паттернов отбора, действующего на неконсенсусные нуклеотиды

Чтобы оценить консервативность некоторого элемента генома, в первую очередь можно попробовать вычислить коэффициент отбора, действующего на этот элемент. Для выявления паттернов отбора, действующего на консенсусные и неконсенсусные нуклеотиды в исследуемых скйтах, мы пользовались таким же подходом, как авторы работы [2]. Мы рассматривали геномы 47 видов *Shewanellaceae* для 6 транскрипционных факторов из семейства GntR. Филогения видов была восстановлена с помощью сервиса PATRIC [3]. Для всех факторов мы получили выравнивания ортологичных сайтов их связывания в имеющихся у нас геномах, а также выравнивания регулируемых (то есть, как правило, следующих за сайтами по цепи ДНК) генов. Далее мы восстановили филогению всех видов с помощью RAxML [4] и получили возможность подсчитывать количество тех или иных замен, происходивших в эволюции сайтов и генов. Известно [2], что коэффициент отбора s может быть вычислен с помощью формул:

$$\omega = \frac{\text{rate of substitution}_{s \neq 0}}{\text{rate of substitution}_{s=0}} = \frac{obs}{exp} = \frac{4N_e s}{1 - e^{-4N_e s}} \quad \text{и} \quad 4N_e s = \ln \left(\frac{obs}{exp} \right) \quad (1)$$

где obs – это скорость возникновения замен в позиции, для которой мы вычисляем s , exp – скорость возникновения замен в позициях, которые мы считаем нейтральными, в нашем случае это синонимические позиции в регулируемом гене, N_e – эффективный размер популяции. Мы вычислили коэффициент отбора, действующий на замены двух типов: $Nc \rightarrow Cn$ и $Cn \rightarrow Nc$. Наблюдаемая частота замен $Nc \rightarrow Cn$ (obs) в некоторой позиции сайта вычислялась по формуле:

$$q(Nc \rightarrow Cn) = \frac{\sum_{Z \in Nc, X \in Cn} (\#Z \rightarrow X)}{\sum_{Z \in Nc, Y \in (\#Z \rightarrow Y)}}, \quad (2)$$

где в числителе количество замен неконсенсусных нуклеотидов на консенсусные в данной позиции сайта, а в знаменателе число замен неконсенсусных нуклеотидов на любой из четырех нуклеотидов. Ожидаемая частота (exp) замен $Nc \rightarrow Cn$ вычислялась тоже по формуле 2, но вместо неконсенсусных и консенсусных нуклеотидов рассматривались такие же нуклеотиды в синонимических позициях регулируемых генов. Например, если в первой позиции сайта консенсусным является нуклеотид А, и встретился неконсенсусный нуклеотид С, то чтобы вычислить obs , мы поделим число замен $C \rightarrow A$ на число замен $C \rightarrow A$, $C \rightarrow T$, $C \rightarrow G$, $C \rightarrow C$ (условная «замена»). Для того, чтобы вычислить exp , мы рассмотрим регулируемый ген и поделим число замен $C \rightarrow A$ на число замен $C \rightarrow A$, $C \rightarrow T$, $C \rightarrow G$, $C \rightarrow C$, которые встречаются в синонимических позициях этого гена. Аналогично рассчитывается коэффициент отбора, действующего на замены $Cn \rightarrow Nc$, по формуле:

$$q(Cn \rightarrow Nc) = \frac{\sum_{Z \in Cn, X \in Nc} (\#Z \rightarrow X)}{\sum_{Z \in Cn, Y \in V} (\#Z \rightarrow Y)} \quad (3)$$

Полученные паттерны отбора для сайтов фактора FadR представлены на рисунке 2.

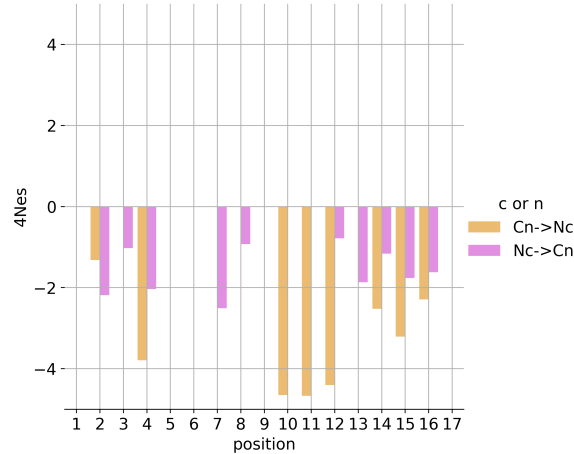


Рис. 2. Коэффициент отбора $4Nes$, рассчитанный по формулам (1) для замен вида $Nc \rightarrow Cn$ и $Cn \rightarrow Nc$ для транскрипционного фактора FadR. Для каждой позиции показано среднее значение по всем генам. Значения, получившиеся равными минус бесконечности (если $obs/exp = 0$), не показаны.

Мы видим, что на консенсусные нуклеотиды действует отрицательный отбор, чего следовало ожидать, потому что консенсусные нуклеотиды важны для связывания фактора с сайтом и должны сохраняться в ходе эволюции. Но мы также видим, что на неконсенсусные нуклеотиды тоже действует отрицательный отбор, сравнимый по силе с таковым для консенсусных нуклеотидов. Значит, по крайней мере некоторые неконсенсусные нуклеотиды по какой-то причине, действительно, консервативны.

2.2 Сравнение консервативности неконсенсусных нуклеотидов в сайтах транскрипционных факторов и консервативности нуклеотидов в синонимических позициях регулируемых генов

Следующий подход, который мы использовали, также ранее использовался авторами [2]. Мы ввели меру консервативности нуклеотида в выравнивании L (на рисунке 3 показано, как она считается, на искусственном примере). L – это филогенетическое расстояние между референсным видом r и самым далеким от него видом x таким, что данный нуклеотид наблюдается во всех видах i таких, что $L(r, i) \leq L(r, x)$.

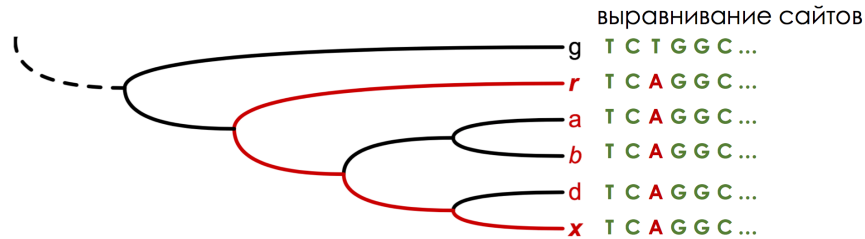


Рис. 3. Расчет меры консервативности L для неконсенсусного нуклеотида. Гипотетическому дереву соответствует гипотетическое выравнивание, в котором зелеными буквами показаны консенсусные нуклеотиды, а красными – неконсенсусные.

Далее мы вычислили L для каждого неконсенсусного нуклеотида в исследуемых сайтах, при этом мы также вычисляли L для всех синонимических нуклеотидов в регулируемом гене, идентичных данному неконсенсусному. Таким образом, для каждого транскрипционного фактора мы получали два распределения (рисунок 4): Observed для неконсенсусных нуклеотидов и Expected для нуклеотидов в синонимических позициях.

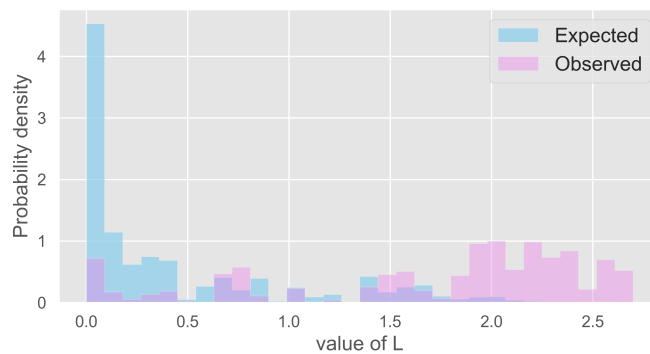


Рис. 4. Распределения меры консервативности L для неконсенсусных нуклеотидов в сайтах (Observed) и соответствующих нуклеотидов в синонимических позициях генов (Expected) для всех генов фактора FadR, минимальное число видов в выравнивании = 15.

Мы видим, что распределение меры консервативности L неконсенсусных нуклеотидов сдвинуто вправо относительно нейтрального контроля. Это – еще одно свидетельство в пользу того, что неконсенсусные нуклеотиды в сайтах связывания по крайней мере некоторых транскрипционных факторов могут быть консервативны.

2.3 Изучение влияния неконсенсусных нуклеотидов на вес сайтов

Предыдущие два подхода были направлены на поиск конкретных консервативных неконсенсусных нуклеотидов, как в левом случае на рисунке 1. В то время

как данный подход нужен для того, чтобы оценить, как связаны неконсенсусные нуклеотиды с сохранением веса сайтов транскрипционных факторов в ходе эволюции. Вес сайта характеризует энергию связывания с ним транскрипционного фактора и вычисляется для конкретного сайта следующим образом:

$$\text{вес} = \sum_{i=1, 2, \dots, l} \log_2 p(N_i), \quad (4)$$

где l – это длина сайта, p – это частота встречаемости наблюдаемого в данном сайте в позиции i нуклеотида N среди всех сайтов данного фактора в этой позиции, p задается позиционно-весовой матрицей (PWM).

Для того, чтобы оценить, насколько вес сайтов консервативен и каков вклад неконсенсусных нуклеотидов в эту консервативность, нужен некоторый контроль, однако подобрать его трудно, поскольку не существует нейтрально эволюционирующей последовательности, для которой можно было бы подсчитать вес. Поэтому мы использовали подход с определенной процедурой рандомизации, который проиллюстрирован на рисунке 5.

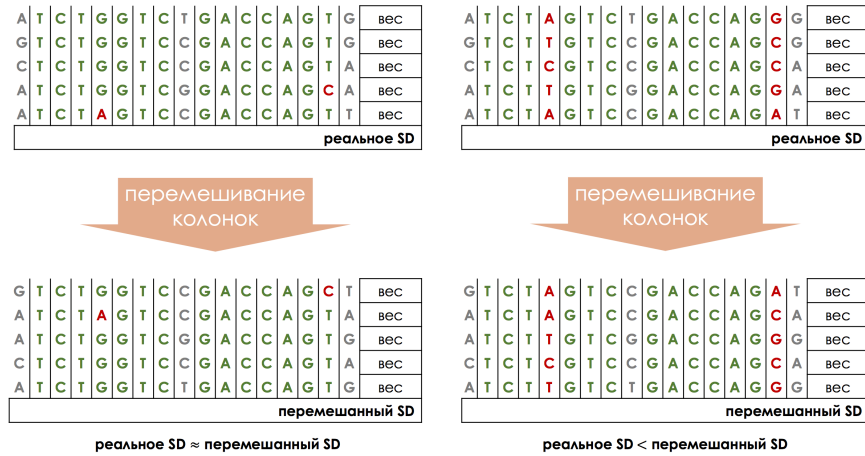


Рис. 5. Процедура рандомизации, показанная на искусственном примере. Зеленые буквы соответствуют консенсусным нуклеотидами, серые – нуклеотидам в позициях, не содержащих консенсуса, а красные – неконсенсусным нуклеотидам. Левая часть – пример рандомизации выравнивания сайтов, в которых неконсенсусные нуклеотиды не вносят существенного вклада в консервативность веса сайтов, правая часть – пример того, как неконсенсусные нуклеотиды могли бы влиять на консервативность веса.

Для каждого выравнивания сайтов мы вычисляли распределение весов всех сайтов в этом выравнивании и стандартное отклонение этого распределения. Затем мы проводили процедуру рандомизации следующим образом: нуклеотиды перемешивались случайным образом внутри колонок выравнивания. Таким образом мы получали рандомизированное выравнивание и опять считали вес для каждого сайта в этом выравнивании, чтобы получить стандартное отклоне-

ние распределения весов сайтов. Затем мы сравнивали стандартное отклонение до рандомизации и после. На рисунке 5 представлены два гипотетических выравнивания сайтов, зеленые буквы соответствуют консенсусным нуклеотидам, серые – нуклеотидам в позициях, для которых нет консенсуса, а красные – неконсенсусным нуклеотидам. В первом случае неконсенсусные нуклеотиды не образуют консервативных позиций, и после рандомизации дисперсия распределения весов в таком случае поменяется слабо. А во втором случае неконсенсусные нуклеотиды сконцентрированы в определенных колонках. При рандомизации, чем более разнообразной была колонка выравнивания, тем сильнее она повлияет на распределение весов сайтов, а именно, увеличит его дисперсию. В таком случае нуклеотиды в позициях без консенсуса (серые буквы) тоже влияют на дисперсию распределения весов. Поскольку однородные колонки выравниваний, как правило, составлены консенсусными нуклеотидами, а неоднородные колонки (также, как и минорные нуклеотиды в однородных колонках) – неконсенсусными нуклеотидами, получается, что вклад в увеличение дисперсии в основном вносят неконсенсусные нуклеотиды. То есть, если мы проделаем с выравниванием процедуру рандомизации и увидим, что распределение весов сайтов стало шире, это будет указывать на то, что именно неконсенсусные нуклеотиды в этом сайте поддерживают вес сайта на определенном уровне в ходе эволюции. Заметим, что данный подход рассчитан на поиск принципиально иных случаев по сравнению с подходами, описанными в 2.1 и 2.2. В предыдущих разделах мы искали случаи консервативности конкретных неконсенсусных нуклеотидов, которые формируют однородные колонки в выравнивании, а значит, не влияют на изменение распределения весов сайтов. Заметим также, что даже если мы обнаруживаем случай, когда дисперсия распределения весов сайтов после рандомизации становится значимо больше, это является только необходимым условием существования консервативных позиций с неконсенсусными нуклеотидами (как показано на рисунке 1 справа), но не достаточным. Неконсенсусные нуклеотиды могут поддерживать вес сайтов на определенном уровне, и не находясь в пределах одной позиции, как показано на рисунке 5 справа.

Итак, рассмотрим результаты этого подхода для транскрипционного фактора FadR, для которого мы изучили 10 выравниваний сайтов толщиной от 15 видов. Сначала мы получили распределения весов реальных сайтов и стандартные отклонения для них (рисунок 6А, розовое распределение).

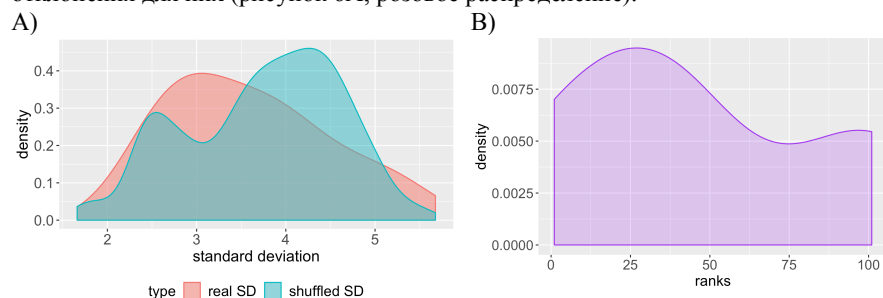


Рис. 6. Результаты подхода с рандомизацией для выравниваний сайтов фактора FadR, рассмотрены 10 выравниваний толщиной от 15 видов. А) Распределения стандартных отклонений распределений весов реальных сайтов (real SD) и сайтов после 100-кратной процедуры рандомизации (shuffled SD) (розовое распределение содержит 10 точек, а зеленое – в 100 раз больше). В) Распределение рангов, которые занимают реальные стандартные отклонения среди 100 стандартных отклонений, полученных после рандомизации.

Затем для каждого выравнивания мы проводили рандомизацию и считали стандартное отклонение распределения весов после нее 100 раз. На рисунке 6А стандартным отклонениям после рандомизации соответствует зеленое распределение. Таким образом, для каждого выравнивания у нас получалось одно реальное стандартное отклонение и 100 стандартных отклонений после рандомизации. Для того, чтобы лучше проиллюстрировать сдвиг зеленого распределения относительно розового на рисунке 6А мы также построили распределение рангов, которые занимают реальные стандартные отклонения среди ста рандомизированных. Распределение полученных рангов представлено на рисунке 6В.

На рисунке 6А видно, что зеленое распределение сдвинуто вправо относительно розового, а на рисунке 6В видно, что распределение рангов ассиметрично и сдвинуто влево, что говорит о том, что дисперсия распределений весов сайтов после рандомизации в среднем выше. Это позволяет нам утверждать, что неконсенсусные нуклеотиды, действительно, в некоторой степени обуславливают консервативность веса сайтов в эволюции. По-видимому, неконсенсусные нуклеотиды в сайте зависят друг от друга, что мы в данной работе определяем, как эпистатическое взаимодействие.

Однако мы не можем сказать, связано ли наблюдаемое явление с консервативностью позиций сайта, содержащих неконсенсусные нуклеотиды, поскольку такой же эффект, как показан на рисунке 5 справа, может быть получен и при неконсенсусных нуклеотидах, не сконцентрированных в одной колонке выравнивания, но при этом все равно эпистатически взаимодействующих друг с другом. С другой стороны, если вес сайта, действительно, поддерживается неконсенсусными нуклеотидами на определенном уровне, то неконсенсусному нуклеотиду для того, чтобы поменять свою позицию в сайте, не меняя при этом веса сайта, требуется как минимум две мутации, и вероятность того, что они произойдут одновременно, крайне мала. Гипотеза о том, что консервативность позиции сайта, содержащей неконсенсусы, является следствием того, что неконсенсусные нуклеотиды поддерживают вес сайтов на определенном уровне, требует дальнейшей проверки.

3 Выводы

1. По крайней мере некоторые неконсенсусные нуклеотиды сохраняются стабилизирующим отбором;
2. Есть четко выраженная группа неконсенсусных нуклеотидов, более консервативных, чем нейтральный контроль;

3. Неконсенсусные нуклеотиды участвуют в сохранении веса сайтов и, следовательно, уровня регуляции транскрипции гена данным транскрипционным фактором.

4 Дальнейшие планы

Хотя мы и наблюдаем консервативность неконсенсусных нуклеотидов, наши результаты пока не позволяют установить точную причину наблюдаемого. Мы должны принимать в расчет возможность того, что эти консервативные нуклеотиды могут являться консенсусными для еще неизвестных регуляторных элементов. Теперь нам нужно выяснить, является ли наблюдаемая консервативность следствием отбора, действующего в рамках другого, неизвестного нам, мотива или следствием того, что приспособленность сайтов с не максимальной аффинностью к фактору транскрипции перед определенными генами выше, чем сайтов с максимальной аффинностью. Для этого мы планируем провести симуляции эволюции сайтов, имитирующие наши данные. Для симуляций мы можем задать определенные параметры ландшафта приспособленности и затем провести с полученными сайтами те же процедуры, что и с данными, чтобы сравнить, как меняются результаты при тех или иных параметрах модели.

Ссылки

1. Kotelnikova, E. A., Makeev, V. J., and Gelfand, M. S. (2005) Evolution of transcription factor DNA binding sites. *Gene* 347, 255–263.
2. Denisov, S. V., Bazykin, G. A., Sutormin, R., Favorov, A. V., Mironov, A. A., Gelfand, M. S., and Kondrashov, A. S. (2014) Weak negative and positive selection and the drift load at splice sites. *Genome Biol. Evol.* 6, 1437–1447.
3. Wattam, Alice R et al. (2014) PATRIC, the bacterial bioinformatics database and analysis resource. *Nucleic acids research* vol. 42, Database issue: D581-91. doi:10.1093/nar/gkt1099
4. Yang, Z. (2007) PAML 4: Phylogenetic analysis by maximum likelihood. *Mol. Biol. Evol.* 24, 1586–1591.

Нейрофиброматоз II типа: трудности дифференциальной диагностики и молекулярно-генетические предикторы течения заболевания

Макашова Е.С.^{1,2}, Карандашева К.О.³, Галкин М.В.¹, Золотова С.В.¹,

Голанов А.В.¹

¹ ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко» МЗ РФ; Москва, 125047, Россия;

² ГБУЗ «Московский клинический научно-практический центр им. А.С. Логинова» Департамента здравоохранения г. Москвы; Москва, 111123, Россия;

³ ФГБНУ «Медико-генетический научный центр имени академика Н.П. Бочкова»; Москва, 115522, Россия

Абстракт

Нейрофиброматоз II типа (НФ II) – редкое наследственное заболевание, характеризующееся развитием множественных доброкачественных опухолей центральной и периферической нервной системы. НФ II развивается в результате мутации в гене NF2, кодирующем синтез белка-онкосупрессора мерлина. Предполагается, что тип и локализация казуальной мутации влияют на тяжесть клинических проявлений и возраст клинического дебюта. В исследование были включены 92 пациента с клиническими проявлениями НФII. Всем пациентам проводилось секвенирование гена NF2 в периферической крови, для выявления протяженных делеций использовался метод множественной амплификации лигированных зондов. Более поздний возраст клинического дебюта и меньшая распространенность процесса отмечалась у пациентов с мозаичными мутациями. Во всех случаях у пациентов с мозаичными вариантами на момент анализа наблюдался сохранный слух. В выборке пациентов с герминальными вариантами выявлялись статистически значимые различия между тяжестью неврологического статуса, возрастом клинического дебюта и локализацией мутации. Таким образом, данные молекулярно-генетической диагностики позволяют выделить группу пациентов неблагоприятного прогноза, что в дальнейшем может позволить изменить тактику наблюдения и терапии.

Ключевые слова: нейрофиброматоз II типа, мерлин, вестибулярная шваннома

1 Введение

Нейрофиброматозы – группа наследственных заболеваний, характеризующихся развитием множественных, преимущественно доброкачественных, опухолей центральной и периферической нервной системы. Выделяют нейрофиброматоз I типа (НФ I), II типа (НФ II) и шванноматоз (ШВНТ). Заболевания отличаются значительной клинической гомогенностью, однако патогенетические механизмы и подходы к терапии существенно отличаются. Особую трудность представляет собой дифференциальная диагностика нейрофиброматоза II типа и шванноматоза, так как клинически заболевания могут быть полностью идентичны. Обязательный признак НФ II – билатеральные вестибулярные шванномы (ВШ), но описаны случаи заболевания с унилатеральной (ВШ), которые могут соответствовать ШВНТ. Кроме того, при НФII развиваются доброкачественные опухоли, признаки заболевания появляются медленно и, зачастую, диагноз устанавливается только на этапе развития нескольких симптоматических опухолей, что ведет к тяжелому неврологическому дефициту и уменьшает количество возможных лечебных опций.

Нейрофиброматоз II типа возникает в результате мутации в гене NF2, кодирующем синтез белка мерлина. Мерлин относится к семейству ERM-белков. Известно 10 изоформ мерлина, однако наиболее экспрессируемыми являются изоформы 1 (Uniprot: P35240-1, RefSeq: NM_000268) и 2 (Uniprot: P35240-3, RefSeq: NM_016418, NM_181832, NM_181825). Мерлин является классическим онкопротектором, кроме того он играет важнейшую роль в поддержании цитоскелета за счет связывания F-актина, трансмембранных рецепторов и внутриклеточных эффекторов для модуляции важнейших сигнальных путей, влияющих на процессы пролиферации.

Золотой стандарт диагностики НФ II – определение патогенной мутации в гене NF2. Однако, с учетом высокой распространенности соматического мозаицизма (по разным данным до 30%), молекулярно-генетическая диагностика заболевания затруднена. Таким образом, основным методом диагностики в рутинной практике остаются клинические критерии, которые применяются также и для определения показаний к проведению ДНК-диагностики. В клинической практике применяются две основных версии клинических критериев: Baser 2011 года и манчестерские 2016 года. Эффективность клинических критериев ранее оценивалась только на небольшой выборке пациентов (менее 100 человек) в единственном исследовании при внедрении данных критериев в практику. Было показано, что применение манчестерских критериев позволяет диагностировать заболевание на первичном приеме менее чем у 14% больных.

Еще одной важной проблемой, связанной с диагностикой и наблюдением в группе пациентов с НФII, является отсутствие предикторов, позволяющих предсказывать течение заболевания и, соответственно, определять тактику динамического наблюдения и терапии. Общепринятым подходом является проведение магнитной резонансной томографии структур центральной нервной системы (головного мозга и всех отделов спинного мозга) ежегодно с подробной оценкой нервно-мышечного статуса. С учетом распространенности процесса, основанием

для проведения терапии является наличие симптоматической опухоли или данные за рост опухоли с высоким риском развития неврологического дефицита. Однако, в ряде случаев отмечается высокая скорость роста опухолей, что требует более частого наблюдения. При этом не существует критериев, которые бы позволяли выделить группу пациентов с неблагоприятным прогнозом для более активного наблюдения и терапии, так что в данном случае тактика ведения таких пациентов основывается, преимущественно, на опыте врача.

II Пациенты и методы

В период с 2020го по февраль 2022го года были обследованы 122 пациента с нейрофиброматозом II типа. Диагноз устанавливался на основании хотя бы одного из общепринятых клинических критериев: манчестерских 2016го года и критериев Baser 2011го года. Всем пациентам проводилось секвенирование гена NF2. Патогенность выявленных генетических вариантов определяли в соответствии с руководством по интерпретации данных последовательности ДНК человека, полученных методами массового параллельного секвенирования (MPS) (редакция 2018, версия 2), согласно критериям ACMG 2017 года. При отсутствии патогенной мутации по результатам секвенирования, проводился поиск протяженных делеций с помощью метода множественной амплификации лигированных зондов. При $AF < 0,35$ вариант считался мозаичным.

III Результаты

Патогенный или вероятно – патогенный генетический вариант удалось выявить в 92 случаях. Чувствительность стандартных методов ДНК-диагностики составила 75.41%. Большая часть случаев была обусловлена герминальными патогенными вариантами, мозаичные варианты выявлены в 12 (13,0%) случаях. У одной пациентки с фенотипом нейрофиброматоза II типа и признаками заболевания с рождения был выявлен патогенный вариант в гене LZRT1, что соответствует шванноматозу. Также соматический мозаичный вариант в гене NF2 был выявлен у пациента с множественными экстра и интракраниальными шванномами и менингиомами, наблюдающегося в ФГАУ НМИЦ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко более 20 лет. За все время наблюдения у пациента не отмечено появления ни одной вестибулярной шванномы.

Отдельно оценивалась чувствительность клинических критериев у пациентов с выявленным патогенным вариантом в гене NF2. Оценка фенотипа по критериям Baser позволяла поставить диагноз практически у всех пациентов через 5 лет после начала заболевания (98,92% чувствительность), однако данные критерии не позволили исключить два случая шванноматоза (прогностическая ценность положительного результата составила 96.84%). Манчестерские критерии позволяли предположить диагноз НФ2 только в 65 случаях, их чувствительность составила всего 70.65% при 100% прогностической ценности положительного результата через пять лет после клинического дебюта. Данные о признаках на момент клинического дебюта были доступны у 49 пациентов. Чувствительность

как критериев Baser, так и манчестерских на момент клинического дебюта составила, соответственно, 100 и 77,7 %. Наиболее значимыми клиническими признаками были билатеральные вестибулярные шванномы, унилатеральная вестибулярная шваннома и сочетание вестибулярной шванномы/менингиомы и эпендимомы. Следует отметить, что к моменту клинического дебюта МРТ ЦНС было выполнено только у 32х (65%) пациентов, что могло быть причиной удлинения времени до установки диагноза.

Выделяют два клинических типа НФ II : среднетяжелый тип Гарднера и тяжелый тип Вишарта. В 2017м году Halliday и соавт. предположили, что клинический тип зависит от типа и локализации патогенной мутации, при этом нонсенс и фреймшифт мутации в экзонах 2-13 ассоциированы с наиболее тяжелым течением заболевания. Наиболее мягкие фенотипы наблюдались у пациентов с соматическим мозаицизмом.

В нашей выборке были проанализированы данные 92х пациентов с выявленными патогенными или VUS-вариантами (7 случаев). В 5 случаев мутации были выявлены только в блоке опухоли, данные этих пациентов были исключены из исследования. Оценка нервно-мышечного статуса у пациентов с НФ II играет ведущую роль в определении тактики лечения, т.к. более агрессивной тактике подлежат, прежде всего, симптоматические опухоли. Однако, с учетом наличия множественных опухолей на разных уровнях с вовлечением краниальных, спинномозговых и периферических нервов-определение уровня поражения может представлять трудную задачу и потребовать специального клинико-нейрофизиологического анализа. Кроме того, в литературе отсутствуют данные о зависимости между типом мутации и скоростью роста опухолей, особенностями нервно-мышечного статуса, что могло бы улучшить выбор тактики лечения и наблюдения в этой группе больных. Средний возраст клинического дебюта в группе пациентов с герминальной казуальной мутацией составил 15,5 лет; средний возраст получения первого лечения – 21 год. В 16 случаях на момент исследования была начата таргетная терапия бевацизумабом, в 1м случае пациентка получала таргетную терапию эверолимусом.

У пациентов с мозаичными формами отмечался более поздний возраст клинического дебюта ($p=0,01$) и менее распространенный процесс, у всех пациентов на момент публикации не наблюдалось снижения слуха ниже III степени тугоухости. В выборке пациентов с герминальными вариантами не отмечалось статистически значимых различий между выраженностью невропатии вестибулокохлеарного нерва (сохранным слухом) и типом мутации. Однако, были выявлены статистически значимые различия между тяжестью неврологического статуса, возрастом клинического дебюта и локализацией мутации ($p=0,037$). При последующем анализе наиболее значимым фактором, влияющим на развитие невропатии слухового нерва было хирургическое лечение. Это связано с отбором пациентов и проведению хирургического лечения преимущественно в случаях гигантских (КООС III-IV) ВШ. Примечательно, что среди пациентов, получавших бевацизумаб более 12 месяцев, не отмечалось ни одного случая ухудшения слуха, в 12 случаях наблюдалось улучшение полезного слуха, подтверждаемое аудиометрией. Предположительно, эффект бевацизумаба связан с уменьшением

экспрессией сосудистого эндотелиального фактора роста VEGF в клетках вестибулярных шванном. Нервно-мышечный статус подробно оценивался у 71го пациента, выраженные гипотрофии мышц конечностей на момент осмотра отмечались в 32х случаях (45%), при этом у 18 пациентов степень гипотрофий не соответствовала степени снижения мышечной силы в двигательных пробах. У 30 пациентов наблюдались деформации дистальных отделов нижних конечностей по типу Фридрейха и формирование фенотипа наследственной сенсо - моторной полиневропатии, что ранее было описано в литературе. Во всех 30 случаях заболевание было обусловлено герминальной нонсенс-мутацией в экзоне 2-13 и отмечалось тяжелое течение заболевания. Вероятнее всего, формирование стопы Фридрейха было связано с ранним развитием опухолей периферических нервов и медленным нарастанием атрофий мышц стоп. У двух пациентов отмечалось также поражение плечевого сплетения, ранее не описанное в литературе для НФ II.

III. Выводы

Исследование молекулярно-генетических особенностей нейрофиброматоза II типа может позволить выделить группу пациентов с ожидаемо неблагоприятным прогнозом: более высоким риском неврологического дефицита и ранним клиническим дебютом. Необходимо проведение дальнейших исследований для выявления зависимости между скоростью роста опухолей, ответом на таргетную терапию и типом и локализацией казуальной мутации. Кроме того, для повышения эффективности диагностики, следует использовать все имеющиеся критерии, возможно обсуждение проведения молекулярно-генетической диагностики у пациентов молодого возраста с наличием хотя бы одного из основных клинических признаков НФII (унилатеральная вестибулярная шваннома, билатеральные вестибулярная шванномы или сочетание унилатеральной ВШ/менингиомы и эпендимомы).

Список литературы

1. Baser ME, Friedman JM, Joe H, et al. Empirical development of improved diagnostic criteria for neurofibromatosis 2. *Genetics In Medicine*. 2011 Jun;13(6):576-81.
2. Evans DG. Neurofibromatosis type 2. *Handbook of clinical neurology*. 2015 Jan 1;132:87-96.
3. Selvanathan SK, Shenton A, Ferner R, et al. Further genotype–phenotype correlations in neurofibromatosis 2. *Clinical genetics*. 2010 Feb;77(2):163-70. doi 10.1111/j.1399-0004.2009.01315.x
4. Halliday D, Emmanouil B, Pretorius P, et al. Genetic Severity Score predicts clinical phenotype in NF2. *Journal of medical genetics*. 2017 Oct 1;54(10):657-64. doi 10.1136/jmedgenet-2017-104519

5. Fiévet B, Louvard D, Arpin M. ERM proteins in epithelial cell organization and functions. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*. 2007 May 1;1773(5):653-60.
6. Lloyd SK, Evans DG. Neurofibromatosis type 2 service delivery in England. *Neurochirurgie*. 2018 Nov 1;64(5):375-80.
7. Gugel I, Zipfel J, Hartjen P, Kluwe L, Tatagiba M, Mautner VF, Schuhmann MU. Managing NF2-associated vestibular schwannomas in children and young adults: review of an institutional series regarding effects of surgery and bevacizumab on growth rates, tumor volume, and hearing quality. *Child's Nervous System*. 2020 Oct;36(10):2471-80.
8. Louvrier C, Pasmant E, Briand-Suleau A, et al. Targeted next-generation sequencing for differential diagnosis of neurofibromatosis type 2, schwannomatosis, and meningiomatosis. *Neuro-oncology*. 2018 Jun 18;20(7):917-29. doi 10.1093/neuonc/now009

Изучение роли структуры хроматина в промотор-энхансерных взаимодействиях у млекопитающих

Первошикова К.Ю.^{1,2} Галицына А.А.^{2,3,*} Гельфанд М.С.^{1,2,3}

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет биоинженерии и биоинформатики

² ИППИ РАН

³ Skoltech

* Прочные аффилиации

kristina.ferryman@yandex.ru

В регуляции транскрипции у млекопитающих задействованы проксимальные регуляторные элементы, в частности, промоторы и дистальные регуляторные элементы, например, энхансеры. Энхансер способен связывать транскрипционные факторы и активировать экспрессию определенного набора генов, находясь при этом на довольно большом расстоянии от старта транскрипции. В настоящее время остается не до конца понятным, что именно определяет активацию экспрессии с конкретного промотора конкретным энхансером. Предполагается, что основную роль в возникновении промотор-энхансерных пар играют два независимых фактора: биохимическая совместимость промотора с энхансером, и структура хроматина, определяющая возможность физического контакта между этими двумя участками в пространстве. Несмотря на появление работ, оценивающих роль структуры хроматина в формировании пар промотор-энхансер, большая часть из них сосредоточена на изучении отдельных геномных локусов. Целью нашей работы стала систематизация роли структуры хроматина в формировании пар промотор-энхансер с использованием биоинформатического анализа. В этой работе мы получили три набора пар промотор-энхансер, характерных для двух типов клеток человека. Используя эти данные мы смогли выяснить, что частота контактов в пространстве между промотором и энхансером вероятно не является определяющим фактором в формировании пар промотор-энхансер. Кроме того, оказалось, что элементы регуляторной пары довольно редко находятся в основании хроматиновых петель. Наш анализ показал, что те промоторы транскрипция которых в наибольшей степени зависит от активности энхансеров, склонны находиться в одних и тех же петлевых доменах со своими энхансерами. В то же время, пары, в которых частота контактов между элементами выше не отличаются от тех, в которых частота ниже, по степени зависимости активности промотора от активности энхансера.

Ключевые слова: промотор, энхансер, регуляция экспрессии, структура хроматина

1. Введение

1.1. Механизмы активации экспрессии энхансерами

Энхансеры - участки генома, способные активировать экспрессию, находясь на значительном расстоянии от регулируемых генов, вне зависимости от взаимной ориентации.[1]

Единого общепринятого механизма, объясняющего активацию экспрессии энхансерами, в настоящее время не существует. Одна из гипотез предполагает, что энхансер, связывая белки-модификаторы хроматина, например гистонацетила transferазу p300, при физическом контакте с промотором может изменять гистоновый код на промоторе и активировать экспрессию. Считается также, что энхансер способен связывать белок Mediator, вовлеченный в инициацию транскрипции. В этом случае контакт промотора с энхансером также будет способствовать активации транскрипции. Также было показано, что энхансеры могут способствовать возобновлению транскрипции после паузы. Паузирование транскрипции вскоре после инициации является одним из свойств РНК полимеразы II. Кофактор BRD4 часто локализуется на энхансерах и может привлекать киназу P-TFb, способствующую возобновлению транскрипции.[2] Альтернативные механизмы реализации энхансерной активности предполагают вовлечение eRNA - транскриптов, получающихся в результате симметричной двунаправленной транскрипции на энхансерах.[3] Продукция таких транскриптов считается признаком того, что энхансер активен.[4]

1.2 Структура хроматина млекопитающих

Вследствие того, что большинство принятых механизмов активации экспрессии энхансерами подразумевают физическое взаимодействие, в рамках этой работы важно обсудить структуру хроматина млекопитающих. Проанализировав карты контактов клеток млекопитающих при помощи Hi-C выяснилось, что хроматин человека характеризуется наличием доменов, непрерывных участков генома, которые имеют больше контактов внутри домена, чем с регионами вокруг.[5] Получив более детальную карту контактов стало понятно, что для структуры хроматина млекопитающих характерны петли. Петли выделяются на карте контактов как яркая точка - повышенная частота контактов между основаниями петли. Петли также представляют собой вариант доменов, таким образом в структуре хроматина млекопитающих можно выделить “обычные” домены и “петлевые” домены. Границы большинства петель содержат сайты связывания белка-инсулятора CTCF в сонаправленной ориентации, а также связывают субъединицы белка когезина.[6] Кроме того, участки генома ассоциируются между собой и на более далеких расстояниях, вплоть до межхромосомных контактов.

Формируются как минимум две группы участков с предпочтительными взаимодействиями между собой, названные компартментами А и В. Компартмент А ассоциирован с более открытым и транскрибируемым хроматином, в то время как компартмент В транскрипционно менее активен.[7]

1.3 Роль структуры хроматина в функционировании промотор-энхансерных пар

Большинство механизмов активации промотора энхансером предполагают возникновение физического контакта между ними. Существует множество дополнительных свидетельств, указывающих на то, что активация промотора энхансером действительно зависит от физического сближения. Например, индуцированное сближение промотора с энхансером может быть достаточным для активации экспрессии. [8–10] В экспериментах по трансдифференцировке стволовых клеток мыши в кортикальные нейроны экспрессия гена коррелирует с частотой контактов между промотором гена и энхансером. [11] Часть контактов между промоторами и энхансерами у млекопитающих по всей видимости обеспечивается за счет белков, контролирующих укладку хроматина - CTCF и когезина. Косвенно на это указывает то, что большая часть промотор-энхансерных взаимодействий располагаются в пределах одного структурного домена [12,13] и, более того, некоторые из пар промотор энхансер при этом находятся на концах петлевых доменов [6]. Эксперименты на отдельных геномных локусах показывают, что энхансер способен активировать таргетный ген в случае, если он располагается вместе с ним в одном домене вне зависимости от линейного расстояния между ними [14]. Кроме того, внедрение CTCF опосредованной границы между промотором и энхансером препятствует активации промотора. [14–16]

В свою очередь, удаление границы между доменами может приводить к активации энхансером промотора из соседнего домена, что зачастую является причиной дефектов развития.[16,17] Эти эксперименты формируют представление о доменах как о структурах, задающих некоторые ограничения на возможность формирования промотор-энхансерных контактов, но при этом не определяющими однозначно промотор-энхансерные пары в пределах домена.

В то же время глобальное нарушение структуры хроматина, наблюдаемое, например, при удалении когезина [18] приводит к малым изменениям в экспрессии, кроме того в единичных клетках контакт между промотором и энхансером не коррелирует с экспрессией.[19] Однако для этих феноменов есть объяснение. [20]

По всей видимости, в некоторых случаях в обеспечении контакта между промоторами и энхансерами задействованы другие белки помимо CTCF и когезина.[21–23]

Также, вероятно существуют способы активации промотора энхансером, не предполагающие прямой контакт.[24]

Существующие на настоящий момент данные освещают роль структуры хроматина в формировании пар промотор-энхансер только для небольшого набора геномных локусов. Целью нашей работы было получить специфичные для клеток человека наборы пар промотор-энхансер и выяснить, есть ли роль у структуры хроматина в формировании пар и в определении степени зависимости активности промотора от активности энхансера.

2. Материалы и методы

2.1. Промотор-энхансерные пары

Так как промотор-энхансерные пары специфичны для конкретного типа клеток, перед нами встала задача получения таких данных. В нашей работе мы использовали данные из работы Gasperini [12] и данные, полученные в результате работы проекта FANTOM. [4]

Пары Gasperini

В работе Gasperini et al., промотор-энхансерные пары определялись при помощи dCas9-CRISPRi пробирования на клетках линии K562. Авторам удалось выявить 664 промотор-энхансерных пары, характерных для клеток K562. Каждой паре при этом присваивается значение FC (fold change), обозначающее то, во сколько раз изменится экспрессия гена при инактивации энхансера. FC всегда меньше 1, поскольку при инактивации энхансера экспрессия таргетного гена уменьшается. После определения стартов транскрипции для генов с использованием аннотации транскриптов RefSeq [25] и удаления близких промотор-энхансерных пар, расположенных <10000 п.о. друг от друга, для анализа осталось 404 пары.

Пары FANTOM

В датасете FANTOM [4] каждой промотор-энхансерной паре соответствует значение R, являющееся коэффициентом корреляции между экспрессией энхансера и экспрессией промотора. Мы интерпретируем R как показатель зависимости активности промотора от активности энхансера. Так как анализ FANTOM был проделан довольно давно, мы исключили из анализа транскрипты, координаты которых согласно RefSeq [25] изменились более, чем на 50 п.о. Аналогично парам Gasperini, мы рассматривали только промотор-энхансерные пары, расположенные на расстоянии > 10 000 п.о.

Пары FANTOM специфичные для K562

Чтобы оставить только пары, активные в линии клеток K562 мы использовали данные по активности (экспрессии) энхансеров, опубликованные группой FANTOM [26]. Мы считали энхансер активным, если он имеет ненулевую экспрессию хотя бы в одной из четырех биологических реплик, соответствующих линии клеток K562: CNhs12334, CNhs12335, CNhs12336, CNhs11250.

Мы решили считать пару промотор-энхансер активной в K562, если активен энхансер из этой пары. Таким образом, для дальнейшего анализа мы оставили 6935 пар промотор-энхансер предположительно активных в линии клеток K562.

Пары FANTOM специфичные для HFF

Так как карта контактов для HFF, которую мы планировали использовать в анализе, есть только для версии сборки hg38, мы предварительно перенесли аннотацию пар FANTOM на версию сборки hg38 с версии сборки hg19 при помощи LiftOver. [27]

Мы считали пару промотор-энхансер активной, если в этом типе клеток активно идет экспрессия с промотора из пары. В качестве данных по экспрессии мы использовали данные из эксперимента ENCSR381OTM базы данных ENCODE. Мы считали, что промотор активен в клетках HFF, если экспрессия соответствующего гена в TPM выше медианы по экспрессии в каждой из трех реплик этого эксперимента.

Для набора пар FANTOM, специфичных для HFF мы решили применить дополнительную процедуру фильтрации, которая позволит минимизировать количество промотор-энхансерных пар, экспрессия которых оказалась скоррелирована не вследствие регуляторных взаимоотношений, а в силу других возможных причин. Для этого мы применили один из подходов, используемых создателями GeneHancer [28]: мы оставляли пару для дальнейшего анализа, если в базе данных GTEx v8 phs000424.v8.p2 [29] есть eQTL который попадает в область энхансера и этому eQTL соответствует тот же ген, что стоит в паре с энхансером. Применив эти процедуры фильтрации мы получили набор из 1350 пар промотор-энхансер.

Стоит отметить, что промотором мы считаем участок -350 +50 п.о. вокруг сайта начала транскрипции, поскольку именно этот регион (по данным исследования автономной активности промоторов) наиболее важен для транскрипции. [30,31]

2.2. Карты контактов и аннотация состояний хроматина

В работе использовались карты контактов для клеток K562 с разрешением 5 кб и соответствующая ей аннотация петель, полученная при помощи алгоритма HiCCUPS [6]. Для клеток HFF использовалась карта контактов с разрешениями 1 кб и 5 кб и соответствующая ей аннотация петель, полученная при помощи алгоритма HiCCUPS.[32]

Для работа с картами контактов использовалась библиотека cooler [33]. Для расчета показателя инсуляции, поиска границ и оценки силы границ по карте контактов использовались функции `calculate_insulation_score` и `find_boundaries` библиотеки `cooltools`. [34]

Частота контактов “наблюдаемая/ожидаемая” (`observed/expected`) между двумя геномными локусами (промотором и энхансером, образующими пару) оценивалась с использованием функции `pileup` библиотеки `cooltools` [34]

Аннотация состояний хроматина для HFF и K562 была получена при помощи алгоритма `Segway` и позаимствована нами [35]. Чтобы проаннотировать энхансеры согласно разметке `Segway`, регион, соответствующий энхансеру пересекался с разметкой с использованием `bioframe` [36], при аннотации промоторов с разметкой пересекался сайт начала транскрипции.

2.3. Генерация ложных пар

Ложные пары - это пары промотор-энхансер, полученные по следующему алгоритму:

(1) Для каждой пары промотор-энхансер выбирается участок генома, расположенный по другую сторону от энхансера относительно промотора. Длина этого участка равна расстоянию от промотора до энхансера. (2) В пределах этого участка выбираются гены, TSS транскриптов которых имеют разброс не более 50 п.о. согласно RefSeq. Координатой TSS гена считается средняя из TSS транскриптов. (3) Из выбранных генов отбираются те, экспрессия которых в данном типе клеток больше медианы. (4) Из оставшихся генов выбирается тот, TSS которого наиболее удален от энхансера. (5) Ложная пара исключается из анализа, если расстояние от энхансера до ложного TSS отличается от расстояния между энхансером и стоящим с ним в паре промотором более чем на 200 000 п.о. или оно меньше, чем 10000 п.о.

Таким образом, каждой паре промотор-энхансер может быть приписан ложный промотор, активный в данном типе клеток и находящийся на сопоставимом расстоянии в паре промотором расстоянием до энхансера. Такие ложные пары были получены для наборов истинных пар Gasperini K562 (92 пары) и FANTOM HFF (249 пар).

2.4. Критерии локализации пар промотор-энхансер относительно петель

У петель есть несколько структурных элементов. Во-первых у каждой петли есть два выделенных участка равного размера, которые сближены у основания - бины границы. Так как границы петель определяются с некоторой погрешностью, мы считали границами петли собственно бины границы и два окружающих бина. Крайний 5' концевой и 3' концевой нуклеотиды границ петель являются началом и концом петли соответственно. Согласно [6] многие пары промотор-энхансер локализируются на границах петель. Мы считали пару промотор-энхансер локализованной на границах петли, если промотор пересекается с одной из границ петли, а энхансер пересекается с другой границей петли.

Мы считали пару локализованной внутри петли, если и промотор и энхансер из пары пересекаются с регионом начало петли - конец петли.

Петлю можно воспринимать как домен. Если промотор локализован внутри домена-петли А, а энхансер - нет, мы называем подобную ситуацию изоляцией промотора от энхансера петлей А

2.5. Статистический анализ и визуализация

Для оценки статистической значимости использовались тесты Mann-Whitney и t-тест. Для расчета тестовых статистик использовались команды `mannwhitneyu` и `ttest_1samp` из библиотеки `scipy`, а также `add_stat_annotation` из библиотеки `statannot`. Для визуализации использовались библиотеки `matplotlib`, `seaborn`, `upsetplot`, `ptitprince`. Для обработки данных использовались библиотеки `pumpru` и `pandas`.

3. Результаты

3.1. Аннотация полученных наборов пар по состояниям хроматина

Большая часть энхансеров из выбранных наборов пар попадает в категории "RegPermissive", "Promoter", "Transcribed". Модификации "RegPermissive" - H3K4me1 и "Promoter" - H3K4me3 свойственны как промоторам, так и энхансерам, поэтому пересечение энхансеров с такими категориями разметки Segway имеет биологическое объяснение. Модификация "Transcribed" -

H3K36me3 с биологической точки зрения тоже может локализоваться на энхансерах, поскольку энхансеры являются транскрибируемыми регионами.

3.2. Роль структуры хроматина в формировании пар промотор - энхансер

Попробуем понять какие характеристики структуры хроматина отличают настоящие пары от ложных, чтобы выяснить какую роль структура хроматина играет в формировании пар.

Настоящие пары контактируют чаще, чем ложные (Рис.1), и различие в частоте контактов значимое (односторонний тест Манна-Уитни), но не значительное. Вероятно частота контактов между локусом промотора и энхансера не является определяющим фактором в формировании промотор-энхансерных пар.

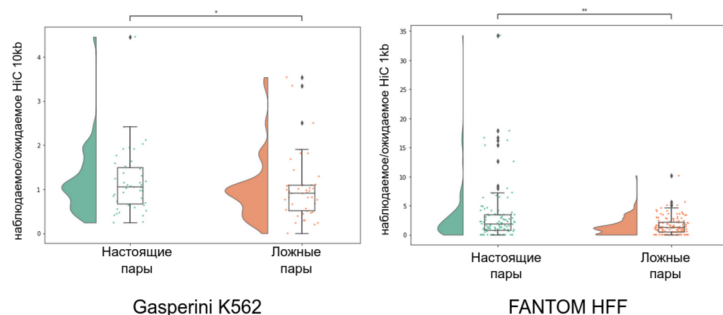


Рис.1 Частота контактов в настоящих и ложных парах

Сравним средний показатель инсуляции на участке отделяющем элементы настоящей пары промотор-энхансер и соответствующий ему показатель ложной пары (Рис.2). Средний показатель инсуляции значимо и значительно больше у настоящих пар промотор-энхансер по сравнению с ложными (Рис.3), при этом эта разница выражена почти на всех размерах окон и на обоих наборах пар. Это означает, что настоящие пары в большей степени сближены в пространстве по данным фиксации конформации, чем ложные пары.

3.3. Анализ роли структуры хроматина в определении влияния энхансера на активность промотора

Связь между частотой контактов и R/FC

На двух из трех наборов пар нам удалось показать, что пары, которые чаще контактируют между собой в пространстве (имеют $obs/exp >$ медианы) также характеризуются значимо более сильной (односторонний тест Манна-Уитни) корреляцией между активностью промотора и энхансера (Рис.4). Однако эти различия незначительны, что говорит об отсутствии непосредственной зависимости между силой активации промотора энхансером и частотой контактов между ними.

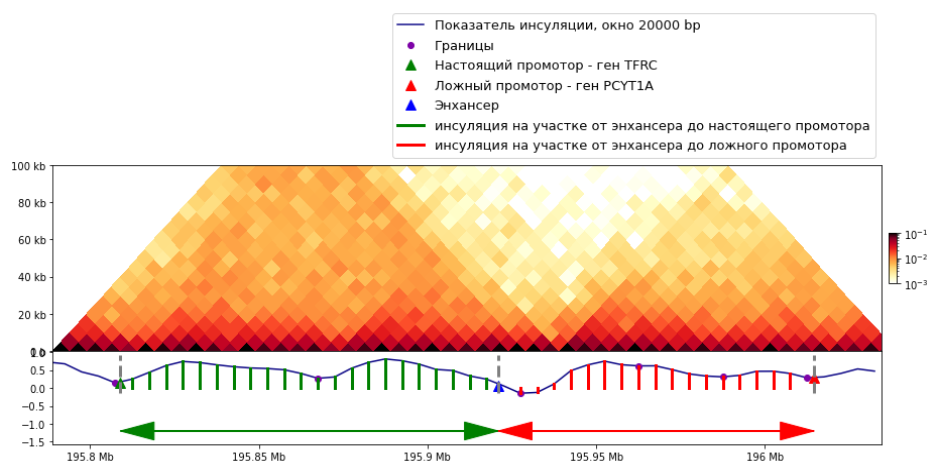


Рис.2 Схема, иллюстрирующая одну из троек (промотор, соответствующий ему энхансер и ложный энхансер) датасета Gasperini K562 на примере гена TFRC и его энхансера

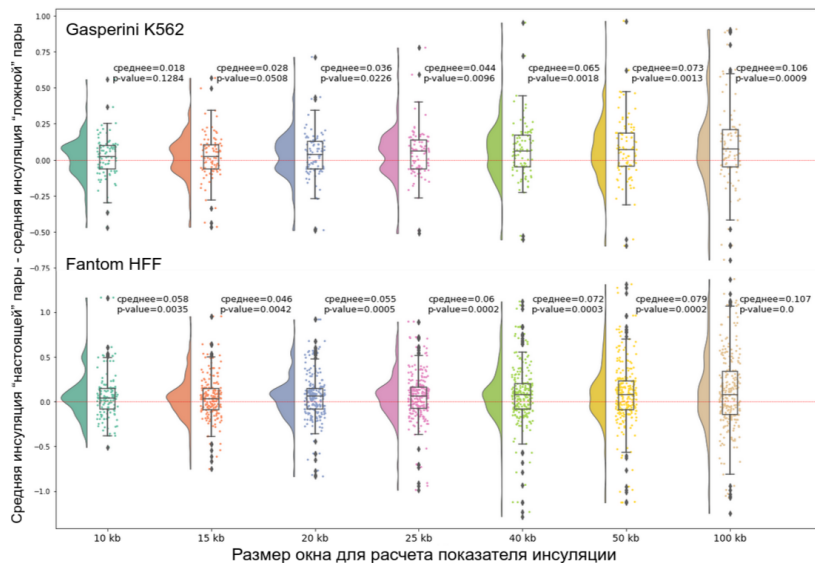


Рис.3 Разница между средним показателем инсуляции настоящих и ложных пар, разрешение карт K562 и HFF 5кб

Связь между локализацией на границах петель и R/FC

В работе Rao 2014 [6] было показано, что большая доля петель ассоциирована с промотор-энхансерными парами. На наших наборах данных оказалось, что только небольшая доля пар локализована на границах петель, кроме того локализация влияет на зависимость промотора от энхансера только на одном из трех датасетов (Данные не приведены).

Связь между локализацией внутри петли и R/FC

Пары локализованные внутри петель характеризуются большей зависимостью активности промотора от активности энхансера на всех трех датасетах (Рис.5 слева). Кроме того, пары в которых хотя бы один элемент изолирован от другого, наоборот, характеризуются меньшей зависимостью активности промотора от активности энхансера (Рис.5 справа).

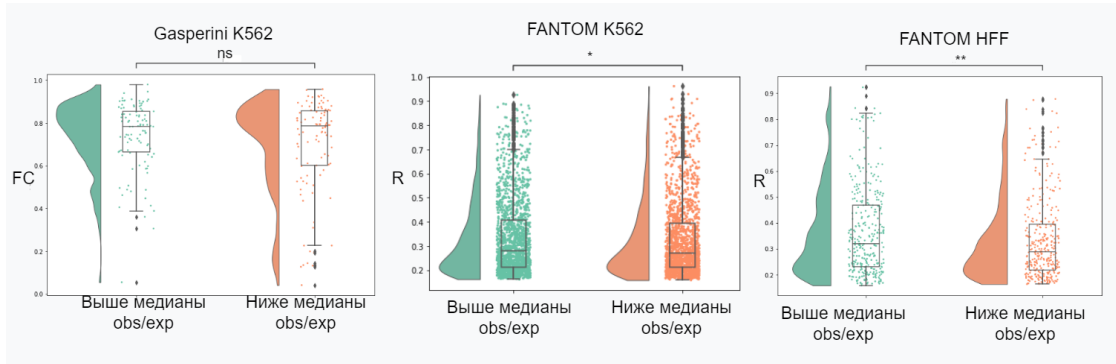


Рис.4 Распределение R и FC в зависимости от частоты контактов, разрешение карт K562 5 кб, HFF 1 кб

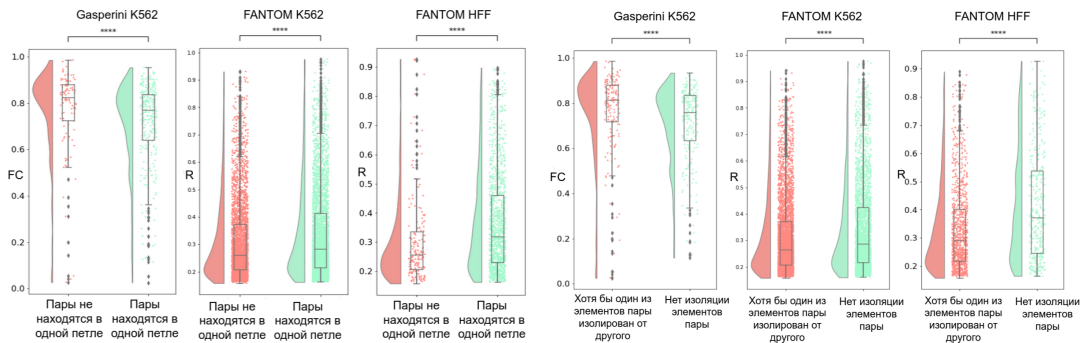


Рис.5 Связь между локализацией пар в пределах одной петли и R/FC (слева) и изоляцией петлями и R/FC (справа)

5. Выводы:

1. Структура хроматина, по всей видимости, не играет определяющей роли в формировании контактов промотор-энхансер.
2. Частота контактов между промотором и энхансером не ассоциирована с зависимостью активности промотора от энхансера.
3. Колокализация внутри петлевого домена и отсутствие изоляции локализацией в разных доменах ассоциированы с повышенной зависимостью активности промотора от активности энхансера.

6. Литература

1. Banerji J, Rusconi S, Schaffner W. Expression of a β -globin gene is enhanced by remote SV40 DNA sequences. *Cell*. 1981. pp. 299–308. doi:10.1016/0092-8674(81)90413-x
2. Haberle V, Stark A. Eukaryotic core promoters and the functional basis of transcription initiation. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 2018. pp. 621–637. doi:10.1038/s41580-018-0028-8
3. Beagrie RA, Pombo A. Gene activation by metazoan enhancers: Diverse mechanisms stimulate distinct steps of transcription. *BioEssays*. 2016. pp. 881–893. doi:10.1002/bies.201600032
4. Andersson R, Gebhard C, Miguel-Escalada I, Hoof I, Bornholdt J, Boyd M, et al. An atlas of active enhancers across human cell types and tissues. *Nature*. 2014;507: 455–461.
5. Dixon JR, Selvaraj S, Yue F, Kim A, Li Y, Shen Y, et al. Topological domains in mammalian genomes identified by analysis of chromatin interactions. *Nature*. 2012. pp. 376–380. doi:10.1038/nature11082
6. Rao SSP, Huntley MH, Durand NC, Stamenova EK, Bochkov ID, Robinson JT, et al. A 3D map of the human genome at kilobase resolution reveals principles of chromatin looping. *Cell*. 2014;159: 1665–1680.
7. Lieberman-Aiden E, van Berkum NL, Williams L, Imakaev M, Ragoczy T, Telling A, et al. Comprehensive mapping of long-range interactions reveals folding principles of the human genome. *Science*. 2009;326: 289–293.
8. Deng W, Lee J, Wang H, Miller J, Reik A, Gregory PD, et al. Controlling Long-Range Genomic Interactions at a Native Locus by Targeted Tethering of a Looping Factor. *Cell*. 2012. pp. 1233–1244. doi:10.1016/j.cell.2012.03.051
9. Morgan SL, Mariano NC, Bermudez A, Arruda NL, Wu F, Luo Y, et al. Manipulation of nuclear architecture through CRISPR-mediated chromosomal looping. *Nat Commun*. 2017;8: 15993.
10. Kim JH, Rege M, Valeri J, Dunagin MC, Metzger A, Titus KR, et al. LADL: light-activated dynamic looping for endogenous gene expression control. *Nat Methods*. 2019;16: 633–639.
11. Bonev B, Mendelson Cohen N, Szabo Q, Fritsch L, Papadopoulos GL, Lubling Y, et al. Multiscale 3D Genome Rewiring during Mouse Neural Development. *Cell*. 2017;171: 557–572.e24.
12. Gasperini M, Hill AJ, McFaline-Figueroa JL, Martin B, Kim S, Zhang MD, et al. A Genome-wide Framework for Mapping Gene Regulation via Cellular Genetic Screens. *Cell*. 2019;176: 1516.
13. Choi J, Lysakovskaia K, Stik G, Demel C, Söding J, Tian TV, et al. Evidence for additive and synergistic action of mammalian enhancers during cell fate determination. *Elife*. 2021;10. doi:10.7554/eLife.65381
14. Symmons O, Pan L, Remeseiro S, Aktas T, Klein F, Huber W, et al. The Shh Topological Domain Facilitates the Action of Remote Enhancers by Reducing the Effects of Genomic Distances. *Dev Cell*. 2016;39: 529–543.
15. Guo Y, Xu Q, Canzio D, Shou J, Li J, Gorkin DU, et al. CRISPR Inversion of CTCF Sites Alters Genome Topology and Enhancer/Promoter Function. *Cell*. 2015;162. doi:10.1016/j.cell.2015.07.038
16. Despang A, Schöpflin R, Franke M, Ali S, Jerković I, Paliou C, et al. Functional dissection of the Sox9–Kcnj2 locus identifies nonessential and instructive roles of TAD architecture. *Nature Genetics*. 2019. pp. 1263–1271. doi:10.1038/s41588-019-0466-z
17. Website. doi:10.1016/j.cell.2015.04.004
18. Rao SSP, Huang S-C, Glenn St Hilaire B, Engreitz JM, Perez EM, Kieffer-Kwon K-R, et al. Cohesin Loss Eliminates All Loop Domains. *Cell*. 2017;171: 305–320.e24.

19. Alexander JM, Guan J, Li B, Maliskova L, Song M, Shen Y, et al. Live-cell imaging reveals enhancer-dependent Sox2 transcription in the absence of enhancer proximity. *eLife*. 2019. doi:10.7554/eLife.41769
20. Xiao JY, Hafner A, Boettiger AN. How subtle changes in 3D structure can create large changes in transcription. *Elife*. 2021;10. doi:10.7554/eLife.64320
21. Rubin AJ, Barajas BC, Furlan-Magaril M, Lopez-Pajares V, Mumbach MR, Howard I, et al. Lineage-specific dynamic and pre-established enhancer-promoter contacts cooperate in terminal differentiation. *Nat Genet*. 2017;49: 1522–1528.
22. Krivega I, Dean A. LDB1-mediated enhancer looping can be established independent of mediator and cohesin. *Nucleic Acids Res*. 2017;45. doi:10.1093/nar/gkx433
23. Olga Kyrchanova PG. Mechanisms of Enhancer-Promoter Interactions in Higher Eukaryotes. *Int J Mol Sci*. 2021;22. doi:10.3390/ijms22020671
24. Benabdallah NS, Williamson I, Illingworth RS, Kane L, Boyle S, Sengupta D, et al. Decreased Enhancer-Promoter Proximity Accompanying Enhancer Activation. *Mol Cell*. 2019;76: 473.
25. [No title]. [cited 9 May 2022]. Available: <http://hgdownload.cse.ucsc.edu/goldenpath/hg19/bigZips/genes/hg19.ncbiRefSeq.gtf.gz>
26. FANTOM5 Human Enhancer Tracks. [cited 9 May 2022]. Available: https://slidebase.binf.ku.dk/human_enhancers/presets
27. Lift Genome Annotations. [cited 9 May 2022]. Available: <https://genome.ucsc.edu/cgi-bin/hgLiftOver>
28. Fishilevich S, Nudel R, Rappaport N, Hadar R, Plaschkes I, Stein TI, et al. GeneHancer: genome-wide integration of enhancers and target genes in GeneCards. *Database*. 2017;2017. doi:10.1093/database/bax028
29. The GTEx Consortium. The GTEx Consortium atlas of genetic regulatory effects across human tissues. *Science*. 2020;369: 1318.
30. van Arensbergen J, FitzPatrick VD, de Haas M, Pagie L, Sluimer J, Bussemaker HJ, et al. Genome-wide mapping of autonomous promoter activity in human cells. *Nat Biotechnol*. 2017;35: 145.
31. Martinez-Ara M, Comoglio F, van Arensbergen J, van Steensel B. Systematic analysis of intrinsic enhancer-promoter compatibility in the mouse genome. doi:10.1101/2021.10.21.465269
32. Krietenstein N, Abraham S, Venev SV, Abdennur N, Gibcus J, Hsieh T-HS, et al. Ultrastructural Details of Mammalian Chromosome Architecture. *Mol Cell*. 2020;78: 554–565.e7.
33. Abdennur N, Mirny LA. Cooler: scalable storage for Hi-C data and other genomically labeled arrays. *Bioinformatics*. 2020;36: 311–316.
34. Venev S, Abdennur N, Goloborodko A, Flyamer I, Fudenberg G, Nuebler J, et al. open2c/cooltools: v0.5.1. Zenodo; 2022. doi:10.5281/ZENODO.6324229
35. Libbrecht MW, Rodriguez OL, Weng Z, Bilmes JA, Hoffman MM, Noble WS. A unified encyclopedia of human functional DNA elements through fully automated annotation of 164 human cell types. *Genome Biol*. 2019;20. doi:10.1186/s13059-019-1784-2
36. Open2C, Abdennur N, Fudenberg G, Flyamer I, Galitsyna AA, Goloborodko A, et al. Bioframe: Operations on Genomic Intervals in Pandas Dataframes. *bioRxiv*. 2022. p. 2022.02.16.480748. doi:10.1101/2022.02.16.480748

Генетические нарушения у пациентов с легочной артериальной гипертензией

Охрименко Галина¹, Малько Дмитрий¹, Осипова Наталья², Федоров Александр¹,
Барышев Павел¹, Данковцева Елена², Затеищikov Дмитрий², Бровкина Ольга¹,
Попцова Мария¹

¹ Высшая школа экономики, Москва, Россия

² Центральная государственная медицинская академия Управления делами Президента
Российской Федерации, Москва, Россия
galina-oxp@mail.ru

Аннотация Легочная гипертензия (ЛГ), как правило, развивается медленно и часто бессимптомно, кроме того, пациенты с ЛГ могут иметь сопутствующие заболевания, что делает определение этиологии болезни и подбор необходимой терапии более затруднительным. Использование клиничко-генетического тестирования помогает выявить ЛГ на фоне других сердечно-сосудистых нозологий. В данном исследовании мы описываем результаты анализа мутаций 432 таргетных гена, связанных с ЛГ, у пациентов с первичным диагнозом - легочная артериальная гипертензия (ЛАГ). Всего было найдено 37 вариантов с клинической значимостью у 19 пациентов. У 11 пациентов было обнаружено по 2 и более нуклеотидных вариантов. Наиболее частыми вариантами были нуклеотидные варианты в гене TTN (всего 4 варианта), а также варианты в гене BMPR2 (всего 2 варианта), при этом варианты в гене TTN имели неопределенную клиническую значимость, а оба варианта гена BMPR2 были патогенными. Всего было обнаружено 7 вариантов, относящихся к патогенным и вероятно патогенным, что позволит пересмотреть диагностику и лечение пациентов-носителей.

Ключевые слова: Легочная гипертензия, таргетные гены, генетическая диагностика

1 Введение

Легочная гипертензия (ЛГ) представляет собой порок сердца, при котором показатель артериального давления, измеренный при катетеризации правых отделов сердца в покое, имеет значения ≥ 25 мм рт.ст [1]. По данным Всемирной организации здравоохранения ЛГ включает пять этиологических групп: легочная артериальная гипертензия (ЛАГ), ЛГ вследствие поражения левых отделов сердца, ЛГ вследствие заболеваний легких или гипоксии, хроническая тромбоэмболическая ЛГ (ХТЛГ) и ЛГ с неясными многофакторными механизмами. Основным патологическим процессом ЛГ является стойкое

давление на легочную сосудистую сеть, что в конечном итоге приводит к усилению кровотока и резистентности сосудов к гемодинамике [2]. Как правило, ЛГ развивается медленно и часто бессимптомно. А при возникновении патологических процессов их могут принять за другую сердечно-сосудистую нозологию. Кроме того, точная классификация внутри групп ЛГ может быть затруднена из-за неясной этиологии и основных механизмов заболевания, поскольку пациенты с ЛГ могут иметь ряд сопутствующих заболеваний, таких как аритмии, сердечная недостаточность, почечная недостаточность, дисфункция печени и сахарный диабет [3]. Вышеуказанные обстоятельства связаны с повышенным уровнем смертности таких пациентов.

В этом случае клиничко-генетическое тестирование может помочь определить этиологию заболевания и стратифицировать пациентов для терапии. Кроме того, генетический подход в диагностике врожденных пороков сердца позволяет выявить бессимптомных кровных родственников пациента и подобрать оптимальные меры профилактики [4].

На данный момент известно большое количество генов, связанных с ЛГ. Поэтому многоцелевой скрининг патогенных вариантов нуклеотидов у пациентов является наилучшей стратегией клинического генетического тестирования. Секвенирование нового поколения (NGS) позволяет одновременно анализировать несколько генов. Для текущего проекта мы разработали специальную панель, включающую 432 гена, связанных с легочной гипертензией, для тестирования 38 пациентов с диагнозом идиопатическая ЛАГ.

Поскольку клинические данные неспецифичны, легочную гипертензию часто не распознают, более того, клиническая картина сердечно-сосудистых нарушений может быть идентична друг другу. Таким образом, основной целью данного исследования является определение генетической основы для каждой подгруппы кардиопатологий.

2 Методы

2.1 Клиническая характеристика образцов

В данном проекте мы применили таргетную панель, включающую 432 гена, связанных с ЛГ, для генотипирования 38 пациентов: 32 женщины и 6 мужчин в возрасте от 20 до 79 лет с медианой в возрасте 30 лет. Диагностика пациентов основывалась на измерении среднего давления в легочной артерии, которое должно быть более 25 мм рт.ст. в покое при катетеризации правых камер сердца и манометрии у пациентов с данным типом нозологии.

2.2 Секвенирование и биоинформатическая обработка данных

В качестве образцов для исследования была взята цельная венозная кровь у пациентов. Подготовка библиотек и секвенирование осуществлялось в коммерческой лаборатории по NGS секвенированию Троицкого нанопарка.

Биоинформатическая обработка данных включала первичную обработку файлов FastQ проводили в программном модуле Sarek[5], включая анализ качества с помощью FastQC, удаление адаптеров, фильтрацию некачественных ридов, картирование ридов на референсные последовательности генома человека GRCh38, дедупликацию и выравнивание последовательностей программами BWA-MEM, samtools и sambamba. Поиск геномных вариантов также проводился в Sarek с помощью пакета программ GATK. Аннотацию геномных осуществляли с помощью Annovar. При интерпретации полученных нуклеотидных вариантов значимыми считались частоты минорных альтернативных аллелей (MAF) <0,1% в gnomAD (база данных агрегации геномов). Учитывались только варианты в области экзонов и +/- 2 нуклеотидных положения сайтов сплайсинга вблизи экзонов. Варианты с синонимичными позициями были исключены из анализа. Следуя рекомендациям по интерпретации данных NGS, патогенность вариантов соответствовала следующим критериям: (i) существующие публикации по этому варианту, (ii) характер варианта (бессмыслица, сдвиг рамки с делецией/вставкой, сплайсинг сайт), (iii) частота в популяционной базе данных, (iv) предсказание патогенности *in silico* с помощью программ, входящих в пакет Annovar (SIFT, PolyPhen2 или MutationTaster). На этапе интерпретации также использовались данные ClinVar (ncbi.nih.gov) и HGMD Professional (Qiagen) для анализа фенотипического проявления вариантов.

2.3 Статистический анализ

Статистическая обработка полученных результатов проводилась с помощью программного обеспечения RStudio -2022.07.1-554.

Сравнительный анализ был сделан с помощью метода хи-квадрат с последующим *post-hoc* анализом данных для коррекции множественного сравнения и выявления групп с наибольшим отличием.

3 Результаты и обсуждение

Всего было выявлено 37 вариантов с клинической значимостью у 19 пациентов. У пациента было обнаружено по 2 и более нуклеотидных вариантов. У 11 пациентов было обнаружено по 2 и более нуклеотидных вариантов. Наиболее частыми вариантами были нуклеотидные варианты в гене TTN (всего 4 варианта), а также варианты в гене BМР2 (всего 2 варианта), при этом варианты в гене TTN имели неопределенную клиническую значимость, а оба варианта гена BМР2 были патогенными. 17 (46%) вариантов представляли собой несинонимичные замены, 11 (30%) вариантов были нонсенс мутациями, 5 (13%) вариантов влияли на сдвиг рамки считывания и 4 (11%) вариантов были инделами.

Всего было обнаружено 7 вариантов, относящихся к патогенным и вероятно патогенным, что позволит пересмотреть диагностику и лечение пациентов-носителей (таблица 1).

Таблица 1. Характеристика патогенных и вероятно патогенных вариантов

Ген	Вариант (кДНК)	Вариант (белок)	Функция	Патогенность
MTO1	c.G1550A	p.Arg517His	missense	Pathogenic
BMPR2	c.C994T	p.Arg332*	stop gain	Pathogenic
F11	c.G403T	p.Glu135*	stop gain	Pathogenic
SERPIND1	c.G623A	p.Arg208His	missense	Pathogenic
SCN5A	c.G2989A	p.Ala997Thr	missense	Likely Pathogenic
ANO5	c.2307_2308del	p.Gln771Alafs*8	frameshift	Pathogenic
BMPR2	c.793_794del	p.R266Sfs*31	indel	Pathogenic

При анализе зависимости переменных не было обнаружено достоверно значимой связи между наличием мутации с полом и возрастом пациентов. Идиопатическая и наследственная ЛАГ формы очень схожи при диагностике. Однако для наследственной ЛАГ имеет ключевое значение своевременное генетическое тестирование. Более того в случае выявления патогенных вариантов необходимо провести скрининг у бессимптомных кровных родственников пациента с целью ранней диагностики и превентивной терапии[6].

Литература

1. Maron, B. A., Abman, S. H., Elliott, C. G., Frantz, R. P., Hopper, R. K., Horn, E. M., Nicolls, M. R., Shlobin, O. A., Shah, S. J., Kovacs, G., Olschewski, H., & Rosenzweig, E. B. Pulmonary Arterial Hypertension: Diagnosis, Treatment, and Novel Advances. *American journal of respiratory and critical care medicine* 203(12), 1472–1487 (2021). doi:10.1164/rccm.202012-4317SO
2. Simonneau, G., Montani, D., Celermajer, D. S., Denton, C. P., Gatzoulis, M. A., Krowka, M., Williams, P. G., & Souza, R. Haemodynamic definitions and updated clinical classification of pulmonary hypertension. *The European respiratory journal*, 53(1), 1801913 (2019). doi:10.1183/13993003.01913-2018
3. Fayyaz, A. U., Edwards, W. D., Maleszewski, J. J., Konik, E. A., DuBrock, H. M., Borlaug, B. A., Frantz, R. P., Jenkins, S. M., & Redfield, M. M. Global Pulmonary Vascular Remodeling in Pulmonary Hypertension Associated With Heart Failure and Preserved or Reduced Ejection Fraction. *Circulation*, 137(17), 1796–1810 (2018).

- doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.117.031608
4. Gräf, S., Haimel, M., Bleda, M., Hadinnapola, C., Southgate, L., Li, W., Hodgson, J., Liu, B., Salmon, R. M., Southwood, M., Machado, R. D., Martin, J. M., Treacy, C. M., Yates, K., Daugherty, L. C., Shamardina, O., Whitehorn, D., Holden, S., Aldred, M., Bogaard, H. J., ... Morrell, N. W. Identification of rare sequence variation underlying heritable pulmonary arterial hypertension. *Nature communications*, 9(1), 1416 (2018).
doi:10.1038/s41467-018-03672-4.
 5. Garcia, M., Juhos, S., Larsson, M., Olason, P. I., Martin, M., Einfeldt, J., DiLorenzo, S., Sandgren, J., Díaz De Ståhl, T., Ewels, P., Wirta, V., Nistér, M., Käller, M., & Nystedt, B. Sarek: A portable workflow for whole-genome sequencing analysis of germline and somatic variants. *F1000Research*, 9, 63 (2020).
doi:10.12688/f1000research.16665.2
 6. Hayes, D., Jr, Ramanathan, C., & Kopp, B. T. The BMPR2 missense mutation p.K230N and pulmonary arterial hypertension. *Pediatric pulmonology*, 49(1), E5–E6 (2014).
doi:10.1002/ppul.22716

Поиск и изучение полу-экстрагируемых РНК

Анна Валяева*^{1,2}, Анастасия Жарикова^{1,3}, Евгений Шеваль^{2,4}, Андрей Миронов^{1,3}

* valyaeva.ann@gmail.com

¹ Факультет Биоинженерии и Биоинформатики, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт физико-химической биологии имени А.Н.Белозерского, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия

⁴ Биологический Факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация Экстракция определенных типов РНК осложнена их физико-химическими свойствами и интенсивными взаимодействиями с белковыми комплексами и другими макромолекулами внутри клеток. Данная работа направлена на описание пула так называемых полу-экстрагируемых РНК, которые с помощью стандартных протоколов экстракции РНК выделяются менее эффективно, чем при использовании метода с дополнительной гомогенизацией. Для поиска полу-экстрагируемых РНК мы адаптировали пайплайн, используемый для анализа дифференциально экспрессируемых генов. Обнаруженные РНК отличались по своему происхождению, структуре и GC-составу. Значимую долю фракции полу-экстрагируемых РНК составили новосинтезируемые и непротранскрибированные транскрипты.

Ключевые слова: РНК-секвенирование, анализ дифференциальной экспрессии генов, длинные некодирующие РНК, архитектурные РНК

Стандартные методы экстракции РНК не позволяют выделить всю клеточную РНК: определенные фракции РНК остаются в связанном состоянии и вместе с белками осаждаются из раствора либо по другим причинам плохо детектируются. Усиленный дополнительной механической гомогенизацией метод экстракции РНК позволяет обогатить выделяемую фракцию так называемыми полу-экстрагируемыми РНК, которые могут быть как белок-кодирующими, так и некодирующими РНК, в том числе архитектурными РНК (например, NEAT1) [1].

В данной работе мы провели эксперимент по выделению РНК стандартным методом и методом с дополнительной гомогенизацией клеточного лизата в шприце (использовалась клеточная линия HeLa, индуцированные плюрипотентные стволовые клетки (iPSC) и дифференцированные из iPSCs нейроны). По две биологические повторности для каждого из использованных

методов экстракции было секвенировано. Для поиска РНК, проявляющих свойство полу-экстрагируемости, был адаптирован пайплайн для анализа дифференциально экспрессируемых генов. Полученные риды были картированы на референсный геном человека GRCh38 с помощью программы HISAT2, и уникально картированные на гены/экзоны/интроны риды были подсчитаны с помощью программы HTSeq count. Анализ дифференциальной экстракции РНК (по аналогии с дифференциальной экспрессией) был произведен с помощью пакета R DESeq2. Анализ экспрессии транспозонов был проведен с помощью программы TETranscripts.

Проведенный анализ показал, что РНК 1219 генов проявляют свойство полу-экстрагируемости (дифференциально экстрагируемые РНК, ДЭ РНК; $\text{padj} < 0.05$, $\text{FC} > 1.5$). В 1.5 и более раз эффективнее при усиленной экстракции выделились РНК 552 белок-кодирующих генов и 584 длинных некодирующих РНК (в том числе NEAT1). GO и KEGG анализ, однако, не позволил выделить какие-то закономерности в функциональных ролях продуктов найденных белок-кодирующих РНК. Вероятно, свойство полу-экстрагируемости связано с какими-то особенностями молекул РНК, а не с тем, что эти молекулы кодируют.

Найденные ДЭ РНК оказались более АТ-богаты, чем экспрессируемая в клетках РНК в среднем. Также мы выяснили, что обнаруженные нами ДЭ РНК преимущественно происходят с хромосом, содержащих большие области гетерохроматина. При анализе экспрессии транспозонов и других повторяющихся последовательностей была выявлена полу-экстрагируемость повторов семейств LINE и LTR.

Кроме того нами было замечено, что ДЭ РНК кодируются более длинными генами. При этом суммарная длина интронных участков у ДЭ генов больше, чем у неДЭ, в то время как число и длины экзонных участков, по видимому, не влияют на свойство полу-экстрагируемости. Поэтому далее мы попытались проанализировать, в каких случаях полу-экстрагируемость определялась интронами, в каких экзонами. Для этого был проведен анализ дифференциальной экспрессии/экстракции отдельно по ридам, картирующимся на интроны или экзоны генов, в результате которого были получены соответствующие списки ДЭ генов. Оказалось, что в большинстве случаев полу-экстрагируемость генов связана с полу-экстрагируемостью именно интронов (365 гена отличались по покрытию интронов, $\text{FC} > 1.5$).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант 21-74-20134).

Список литературы

1. Kurosaka S, Chujo T, Takumi T, Hirose T, Nakagawa S, Kawaguchi T, et al. Unusual semi-extractability as a hallmark of nuclear body-associated architectural noncoding RNAs. *EMBO J.* 2017;36: 1447–1462.

Intragenic compensation in deep mutational scanning data

Nadezhda Azbukina¹ ridernadya@gmail.com, Anastasia Zharikova^{1,2} azharikova89@gmail.com, and Vasily Ramensky^{1,2} ramensky@gmail.com

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,

² National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow, Russia

Abstract. Intragenic compensation is a specific case of positive epistasis in which a neutral missense mutation alleviates effect of a deleterious mutation in the same protein. Such compensatory (trailing) or permissive (preceding) mutations facilitate protein evolution: since most mutations are deleterious, without compensation all sequences would be extremely conserved. Understanding intragenic compensation mechanisms is important both from practical point of view and to understand the fundamental basis of protein biophysics and evolution. Deep mutational scanning enables experimental studies of functional effects of thousands of single and double mutations in proteins. We conducted a meta-analysis of eight DMS datasets with quantified functional effects of single and double mutations, described rates and patterns of intragenic compensation and reviewed existing limitations of current data.

Keywords: epistasis, intragenic compensation, deep mutational scanning

1 Introduction

Epistasis denotes non-additive interactions between different genetic loci, so that combined effect of two or more mutations deviates from the sum of their individual effects [1]. It is now generally accepted that epistatic interactions are common between loci within the same gene and are one of the driving forces of protein evolution [2]. Intragenic compensation is a particular form of positive epistasis, in which a combination of a deleterious (compensated) and neutral (compensator) mutation is mutually neutral [3]. In human disease genetics, intragenic compensatory interactions are quite important since they can lead to variable penetrance of pathogenic variants related to Mendelian diseases [4] and to fixation of pathogenic human alleles in orthologous proteins from related species [5, 6]. The latter phenomenon may limit the prediction ability of computational tools that use phylogenetic information to predict the functional impact of missense variants [7, 8]. Despite the important role of compensatory mutations for various biological processes, our current knowledge of their prevalence and mechanisms is limited.

Experimental studies of epistatic interaction in proteins are still prohibitively complex. The development of the experimental technique called deep mutational scanning (DMS) [9] enables large-scale studies of genotype-phenotype relationships by quantitative analysis of molecular phenotypes for the unprecedented number of protein amino acid variants. A DMS study yields a set of scores that describe the functional effect of thousands to tens of thousands of variants of a protein coding sequence. An ideal DMS output reports functional effects of all possible amino acid substitutions in a whole protein or a functionally important domain in a single experiment; unfortunately, perfect completeness of the substitution dataset is not yet common, except for the few comprehensive cases.

Table 1. DMS datasets used in this study

Protein	UniProt ID	Double mutations	Compensated deleterious, %	Ref.
IgG-binding domain of protein G (GB1)	SPG1_STRSG	535,917	13.0	[10]
U-box domain of the murine ubiquitination factor (E4B)	UBE4B_MOUSE	51,899	15.4	[11]
The second RRM domain of <i>S. cerevisiae</i> Pab1 protein	PABP_YEAST	36,511	2.3	[12]
WW domain of the human YAP1 protein	YAP1_HUMAN	19,360	7.8	[13]
Green fluorescent protein from <i>A. victoria</i> (avGFP)	GFP_AEQVI	11,954	2.5	[14]
RING domain of the human BRCA1 protein	BRCA1_HUMAN	4,213	18.3	[15]
RING domain of the human BRCA1 protein	BRCA1_HUMAN	2,152	12.0	[15]
Human SUMO-conjugating enzyme UBC9 (UBE2I)	UBC9_HUMAN	1,151	0.6	[16]

2 Results

We used the maveDB database [17] and stand-alone publications to conduct the meta-analysis of eight DMS datasets with quantified functional effects of single and double mutations to describe intragenic compensation in proteins. The eight datasets represent seven proteins and differ in size and completeness of mutation sets by orders of magnitude (Table 1). The most comprehensive one is the pioneering study of 55 adjacent positions of the IgG-binding domain

of protein G (GB1) [10]. In this dataset, strong positive and negative epistasis was observed in 18% and 11% pairs, respectively. In the seven other datasets included in the analysis, the strong negative epistasis is observed in 4-19% of pairs, and positive in 3-36% cases.

In GB1, 13% of deleterious mutations are compensated by neutral ones which is in agreement with the studies in human or model organism genetics [5, 18]. In the 7 other datasets (Table 2), this fraction is in the range 12-18% in three datasets (E4B, both BRCA1) and 0.6-8% in the other four (Pab1, Yap1, GFP, UBE2L). In all cases except for GB1, most compensation interactions were one-to-one, with numbers of compensators in each dataset close to the number of their deleterious partners, most likely due to the under-sampling of putative compensating interactions. The fraction of local compensation events in the seven datasets is 42% which is in good agreement with 46% in the GB1 dataset and significantly exceeds 24%, the fraction of local pairs among all pairs in these datasets.

Table 2. Intragenic compensation in DMS datasets. Pairs, total number of compensating interactions; Rate, percent of compensated deleterious; Local, percent of sequential or close pairs among compensators

Dataset	Pairs	Rate	Local
GB1	121	13%	46%
Other	192	0.8-18%	42%

3 Conclusions

Our meta-analysis of DMS datasets with quantified effects of double and single mutations suggests that severe deleterious mutations reducing the functional activity of a protein by order of magnitude are less likely to be compensated than those that result in 2-3-fold reduction. The observed fraction of compensated deleterious mutations is in the range 1%-18% and in most datasets is in agreement with the estimate of approximately 10% from human and model organism genetics field. The intragenic compensation pairs are enriched with local interactions, with nearly one half occurring within 6 Å or between sequential neighbors. Our analysis emphasizes the importance of high quality measurements and completeness of fitness effects, especially for double mutants, to enable quantification of epistatic interactions and compensation events.

4 Acknowledgments

This work was supported by the RFBR research project no 20-54-12008.

References

1. Starr, T.N., Thornton, J.W.: Epistasis in protein evolution. *Protein Science*. 25, 1204–1218 (2016). <https://doi.org/10.1002/pro.2897>.
2. McCandlish, D.M., Rajon, E., Shah, P., Ding, Y., Plotkin, J.B.: The role of epistasis in protein evolution. *Nature*. 497, E1–E2 (2013). <https://doi.org/10.1038/nature12219>.
3. Kimura, M.: The role of compensatory neutral mutations in molecular evolution. *J. Genet.* 64, 7 (1985). <https://doi.org/10.1007/BF02923549>.
4. Cooper, D.N., Krawczak, M., Polychronakos, C., Tyler-Smith, C., Kehrer-Sawatzki, H.: Where genotype is not predictive of phenotype: towards an understanding of the molecular basis of reduced penetrance in human inherited disease. *Hum Genet.* 132, 1077–1130 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00439-013-1331-2>.
5. Kondrashov, A.S., Sunyaev, S., Kondrashov, F.A.: Dobzhansky-Muller incompatibilities in protein evolution. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 99, 14878–14883 (2002). <https://doi.org/10.1073/pnas.232565499>.
6. Jordan, D.M., Frangakis, S.G., Golzio, C., Cassa, C.A., Kurtzberg, J., Task Force for Neonatal Genomics, Davis, E.E., Sunyaev, S.R., Katsanis, N.: Identification of cis-suppression of human disease mutations by comparative genomics. *Nature*. 524, 225–229 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature14497>.
7. Sunyaev, S.R.: Inferring causality and functional significance of human coding DNA variants. *Human Molecular Genetics*. 21, R10–R17 (2012). <https://doi.org/10.1093/hmg/dds385>.
8. Tang, H., Thomas, P.D.: Tools for Predicting the Functional Impact of Nonsynonymous Genetic Variation. *Genetics*. 203, 635–647 (2016). <https://doi.org/10.1534/genetics.116.190033>.
9. Fowler, D.M., Fields, S.: Deep mutational scanning: a new style of protein science. *Nat Methods*. 11, 801–807 (2014). <https://doi.org/10.1038/nmeth.3027>.
10. Olson, C.A., Wu, N.C., Sun, R.: A comprehensive biophysical description of pairwise epistasis throughout an entire protein domain. *Curr Biol*. 24, 2643–2651 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.09.072>.
11. Starita, L.M., Pruneda, J.N., Lo, R.S., Fowler, D.M., Kim, H.J., Hiatt, J.B., Shendure, J., Brzovic, P.S., Fields, S., Kleit, R.E.: Activity-enhancing mutations in an E3 ubiquitin ligase identified by high-throughput mutagenesis. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 110, E1263–1272 (2013). <https://doi.org/10.1073/pnas.1303309110>.
12. Melamed, D., Young, D.L., Gamble, C.E., Miller, C.R., Fields, S.: Deep mutational scanning of an RRM domain of the *Saccharomyces cerevisiae* poly(A)-binding protein. *RNA*. 19, 1537–1551 (2013). <https://doi.org/10.1261/rna.040709.113>.
13. Araya, C.L., Fowler, D.M., Chen, W., Muniez, I., Kelly, J.W., Fields, S.: A fundamental protein property, thermodynamic stability, revealed solely from large-scale measurements of protein function. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 109, 16858–16863 (2012). <https://doi.org/10.1073/pnas.1209751109>.
14. Sarkisyan, K.S., Bolotin, D.A., Meer, M.V., Usmanova, D.R., Mishin, A.S., Sharonov, G.V., Ivankov, D.N., Bozhanova, N.G., Baranov, M.S., Soylemez, O., Bogatyreva, N.S., Vlasov, P.K., Egorov, E.S., Logacheva, M.D., Kondrashov, A.S.,

- Chudakov, D.M., Putintseva, E.V., Mamedov, I.Z., Tawfik, D.S., Lukyanov, K.A., Kondrashov, F.A.: Local fitness landscape of the green fluorescent protein. *Nature*. 533, 397–401 (2016). <https://doi.org/10.1038/nature17995>.
15. Starita, L.M., Young, D.L., Islam, M., Kitzman, J.O., Gullingsrud, J., Hause, R.J., Fowler, D.M., Parvin, J.D., Shendure, J., Fields, S.: Massively Parallel Functional Analysis of BRCA1 RING Domain Variants. *Genetics*. 200, 413–422 (2015). <https://doi.org/10.1534/genetics.115.175802>.
 16. Weile, J., Sun, S., Cote, A.G., Knapp, J., Verby, M., Mellor, J.C., Wu, Y., Pons, C., Wong, C., van Lieshout, N., Yang, F., Tasan, M., Tan, G., Yang, S., Fowler, D.M., Nussbaum, R., Bloom, J.D., Vidal, M., Hill, D.E., Aloy, P., Roth, F.P.: A framework for exhaustively mapping functional missense variants. *Mol Syst Biol*. 13, (2017). <https://doi.org/10.15252/msb.20177908>.
 17. Esposito, D., Weile, J., Shendure, J., Starita, L.M., Papenfuss, A.T., Roth, F.P., Fowler, D.M., Rubin, A.F.: MaveDB: an open-source platform to distribute and interpret data from multiplexed assays of variant effect. *Genome Biol*. 20, 223 (2019). <https://doi.org/10.1186/s13059-019-1845-6>.
 18. Kulathinal, R.J., Bettencourt, B.R., Hartl, D.L.: Compensated deleterious mutations in insect genomes. *Science*. 306, 1553–1554 (2004). <https://doi.org/10.1126/science.1100522>.

Особенности эволюции С-концевого домена белков нуклеоплазминового семейства

Вяльцев В.¹, Ильницкий И.¹, Жарикова А.^{1,2}, Миронов А.^{1,2}

¹ Факультет Биоинженерии и Биоинформатики МГУ имени Ломоносова, Москва

² Институт проблем передачи информации имени А. А. Харкевича РАН, Москва
vyaltsevvaleriy7@gmail.com

Аннотация. Нуклеоплазминовые белки выполняют множество важных функций, многие из которых обусловлены наличием в них особого С-концевого домена. Считается, что данный домен встречается в основном у позвоночных, однако в базе UniProt он аннотирован ещё и у белков стрекающих, иглокожих и пластинчатых. Чтобы понять, как мог эволюционировать С-концевой домен и у кого он на самом деле представлен, мы собрали из баз данных UniProt, NCBI NT и TSA 1080 белковых последовательностей и аннотировали в них С-концевой домен. По представленности домена в различных таксономических группах мы выдвинули предположение о пути его эволюции у животных, а также провели проверку экспрессии соответствующих генов у ряда модельных организмов.

Ключевые слова: нуклеоплазмин, нуклеофозмин, NPM, NPM1-С.

Впервые белок, впоследствии классифицированный как нуклеоплазмин, был обнаружен у *Xenopus laevis*, и для него была показана функция шаперона гистонов [1]. Позже похожие белки были обнаружены у человека. Оказалось, что в человеке экспрессируются три белка – NPM1, NPM2 и NPM3, каждый из которых выполняет функцию шаперона гистонов за счет наличия областей из кислых аминокислот в последовательности [2]. Помимо этого, у каждого из них есть свои особенности, например, NPM1, он же нуклеофозмин, в основном локализуется в ядрышке, однако может перемещаться между ядром и цитоплазмой, для него были показаны взаимодействие с нуклеиновыми кислотами, участие в сборке рибосом, формировании ядрышка, репарации, митозе, репликации, транскрипции и апоптозе, а мутации в данном белке могут вызывать острую миелоидную лейкемию [3]. NPM1 в клетке существует в виде пентамера, часть мономеров из которого может заменяться на NPM3. NPM3 самостоятельно роль гистонового шаперона не играет [4]. NPM2 в свою очередь важен для ремоделирования хроматина сперматозоидов и в ходе раннего эмбриогенеза, а также является основным компонентом ядрышка ооцита [2].

Группы белков NPM1, NPM2 и NPM3 выделяют в основном для позвоночных животных. Белки, принадлежащие беспозвоночным, причисляют к группе NPM-like белков [2]. В белках нуклеоплазминового семейства встречается два домена: N-концевой нуклеоплазминовый домен, ответственный за олигомери-

зацию, по наличию которого определяется принадлежность к семейству, и С-концевой домен, который, как принято считать, встречается в основном в NPM1 позвоночных и может взаимодействовать с рРНК [2] и с G-квадруплексами в ДНК [5]. Однако, при поиске в белковых базах данных нам удалось обнаружить белки нуклеоплазминового семейства из беспозвоночных, которые содержат С-концевой домен, в частности, некоторые из таких белков принадлежат трихоплаксу, некоторым представителям стрекающих и иглокожих [6]. Данная работа направлена на определение эволюционного пути С-концевого домена и выявление причин его присутствия в одних таксономических группах и отсутствия в других, какие эволюционные события могли привести к этому. Для этого были использованы методы построения филогенетических деревьев на основе приписанных к нуклеоплазминовому семейству последовательностей, полученных из белковых баз данных Pfam и UniProt. Руководствуясь общими представлениями о структуре белков нуклеоплазминового семейства, из базы данных UniProt и с помощью tblastn из баз NCBI NT и TSA для анализа мы собрали 1080 белковых последовательностей, принадлежащих 651 организму. Среди полученных последовательностей С-концевой домен помимо Placozoa, Cnidaria и Echinodermata, у которых данный домен аннотирован Pfam, был выявлен у нуклеоплазминовых белков следующих таксономических групп: Xenacoelomorpha, Stenophora, Porifera, Tunicata, Hemichordata, а также Choanoflagellata. Аннотация доменов проводилась с помощью сервиса InterPro, однако не во всех случаях удавалось аннотировать С-концевой домен, поэтому его наличие в некоторых последовательностях было установлено с помощью множественного выравнивания с имеющими С-концевой домен последовательностями и сравнения предсказанной AlphaFold [7] структуры с известной структурой домена. Помимо этого, с помощью программы IQ-TREE [8] было построено филогенетическое дерево нуклеоплазминовых доменов, которое получилось неразрешенным. Тем не менее, учитывая современные представления о систематике Metazoa, мы предполагаем, что С-концевой домен мог возникнуть у общего предка хоанофлагеллят и многоклеточных животных, и затем он был потерян общим предком Spiralia и Ecdysozoa. Nematoda, по всей видимости, могли полностью утратить нуклеоплазминовые белки, поскольку у этой группы они не были найдены. Дополнительно для ряда модельных организмов была проведена проверка экспрессии генов, кодирующих нуклеоплазминовые белки.

Список литературы

1. Laskey, R., Honda, B., Mills, A. et al. Nucleosomes are assembled by an acidic protein which binds histones and transfers them to DNA. *Nature* 275, 416–420 (1978).
2. Frehlick, L. J., Eirín-López, J. M., & Ausió, J. (2007). New insights into the nucleophosmin/nucleoplasmin family of nuclear chaperones. *BioEssays : news and reviews in molecular, cellular and developmental biology*, 29(1), 49–59. Author, F., Author, S., Author, T.: Book title. 2nd edn. Publisher, Location (1999).

3. Karimi Dermani, F., Gholamzadeh Khoei, S., Afshar, S., & Amini, R. (2021). The potential role of nucleophosmin (NPM1) in the development of cancer. *J Cell Physiol*, 236, 7832–7852.
4. Mitsuru Okuwaki, Ayako Sumi, Miharu Hisaoka, Ai Saotome-Nakamura, Satoko Akashi, Yoshifumi Nishimura, Kyosuke Nagata, Function of homo- and hetero-oligomers of human nucleoplasmin/nucleophosmin family proteins NPM1, NPM2 and NPM3 during sperm chromatin remodeling, *Nucleic Acids Research*, Volume 40, Issue 11, 1 June 2012, Pages 4861–4878
5. Gallo, A., Lo Sterzo, C., Mori, M., Di Matteo, A., Bertini, I., Banci, L., Brunori, M., & Federici, L. (2012). Structure of nucleophosmin DNA-binding domain and analysis of its complex with a G-quadruplex sequence from the c-MYC promoter. *The Journal of biological chemistry*, 287(32), 26539–26548.
6. Matoba, K., Matsumoto, Y., Hongo, T., Nagamatsu, Y., Sugino, H., Shimizu, T., Takao, T., Shimonishi, Y., & Ikegami, S. (2000). Chemical structure of nuclear proteins which are phosphorylated during meiotic maturation of starfish oocytes. *Biochemistry*, 39(21), 6390–6400.
7. Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A. et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature* 596, 583–589 (2021).
8. B.Q. Minh, H.A. Schmidt, O. Chernomor, D. Schrempf, M.D. Woodhams, A. von Haeseler, R. Lanfear (2020) IQ-TREE 2: New models and efficient methods for phylogenetic inference in the genomic era. *Mol. Biol. Evol.*, 37:1530-1534.

Сравнительный анализ данных экспериментов Red-C и Hi-C

Д.С. Звездин¹, А.А. Жарикова^{1, 2, 3}, А.А. Миронов^{1, 3}

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
факультет биоинженерии и биоинформатики, Ленинские горы, 1, стр. 73, Москва,
119992, Россия

² ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины», Петроверигский пер., д. 10с3, Москва, 109074, Россия

³ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук (ИППИ РАН), Большой Каретный переулок д.19 с.1, Москва,
127051, Россия
dima.zvezdin1@gmail.com

Аннотация. В ядре эукариотической клетки присутствует множество различных некодирующих РНК, многие из которых задействованы в регуляторных процессах, происходящих в хроматине. Одной из таких функций является поддержание архитектурных элементов, таких как петли, ТАДы и ядерные тельца. Предположительно, РНК, участвующие в таких процессах, должны активно контактировать со сближенными участками хроматина. В данной работе проводится поиск таких РНК на основании данных экспериментов Red-C и Hi-C.

Ключевые слова: Хроматин, некодирующие РНК, Hi-C, Red-C.

1 Введение

Большая часть ядерного генома человека транскрибируется, однако количество транскриптов, кодирующих белки невелико. Есть множество типов некодирующих РНК, которые выполняют различные функции в ядре клетки. К этим функциям относятся регуляция генной экспрессии и поддержание пространственной организации архитектурных элементов. Длинная некодирующая РНК Xist осуществляет дозовую компенсацию генов одной из X-хромосом. РНК MALAT1 играет роль одного из структурных элементов ядерных спеклов, участвующих в регуляции сплайсинга. О возможном участии РНК в организации петель хроматина говорит наличие РНК-связывающего домена у ряда белков, поддерживающих структуру петель, таких как CTCF [1]. В данной работе для поиска РНК, которые потенциально могут выполнять подобные функции были использованы данные экспериментов Red-C и Hi-C.

Экспериментальный протокол Hi-C позволяет построить полногеномную карту контактов локусов ДНК друг с другом, по которой можно судить о пространственном расположении участков хромосом. На первом этапе формируются шивки с использованием формальдегида, затем ДНК фрагментируют рестриктазами, концы фрагментов затушивают биотинилированными нуклеотидами. Полученные фрагменты выделяют и секвенируют с использованием высокопроизводительного секвенирования [2].

Эксперимент Red-C позволяет получить информацию о контактах всех РНК в ядрах клеток с хромосомами. По своей сути протокол похож на Hi-C, с принципиальным отличием в способе лигирования, оно происходит через адаптер, к одному концу которого присоединяется РНК, а к другому - ДНК. Полученные химерные фрагменты, выделяют, очищают и секвенируют. Результатом является полногеномная карта контактов всех наблюдаемых транскриптов со всеми участками ДНК [3].

Если РНК участвует в поддержании архитектурных элементов хроматина, вероятно, она склонна с ними контактировать. Тогда можно предположить, что такие РНК склонны взаимодействовать с локусами ДНК, расположенными близко в пространстве. О пространственной близости локусов ДНК можно судить по количеству контактов между ними в карте Hi-C. Для оценки того насколько часто у РНК наблюдаются сближенные в пространстве контакты, необходима фоновая модель для сравнения, в качестве которой были использованы Hi-C карты со сдвинутыми на 2 миллиона нуклеотидов координатами. Для сохранения структуры хромосом, не сдвигались теломеры и центромеры, участки A/B компартментов двигались независимо для сохранения их структуры.

2 Результаты

Были взяты данные Red-C для линии клеток K562 и Hi-C данные из исследования Rao 2014 для той же линии [4]. Для анализа были выбраны 1024 РНК, склонные контактировать с хроматином. Это определялось отношением общего

числа их контактов с хроматином и их количества в клетке из данных РНК-секвенирования. Для каждой РНК и каждой хромосомы контакты РНК-ДНК рассматривались попарно, производился подсчет пространственно близких и дальних пар, что определялось на основании Hi-C карты. Далее аналогичная процедура повторялась для сдвинутой Hi-C карты. Статистическая значимость наблюдаемого различия между реальной и фоновой моделью оценивалась с использованием точного теста Фишера.

Статистически значимые результаты были получены для 395 РНК, для контактов как минимум с одной из хромосом. Большая часть наиболее значимых результатов относится к различным типам некодирующих РНК (см. рис. 1), среди которых: малые ядерные РНК, играющие ключевую роль в сплайсинге, малые ядрышковые РНК, осуществляющие процессинг рибосомальных РНК, а также длинные некодирующие РНК, для которых известны различные функции в организации регуляторных процессов хроматина и формировании его структур.

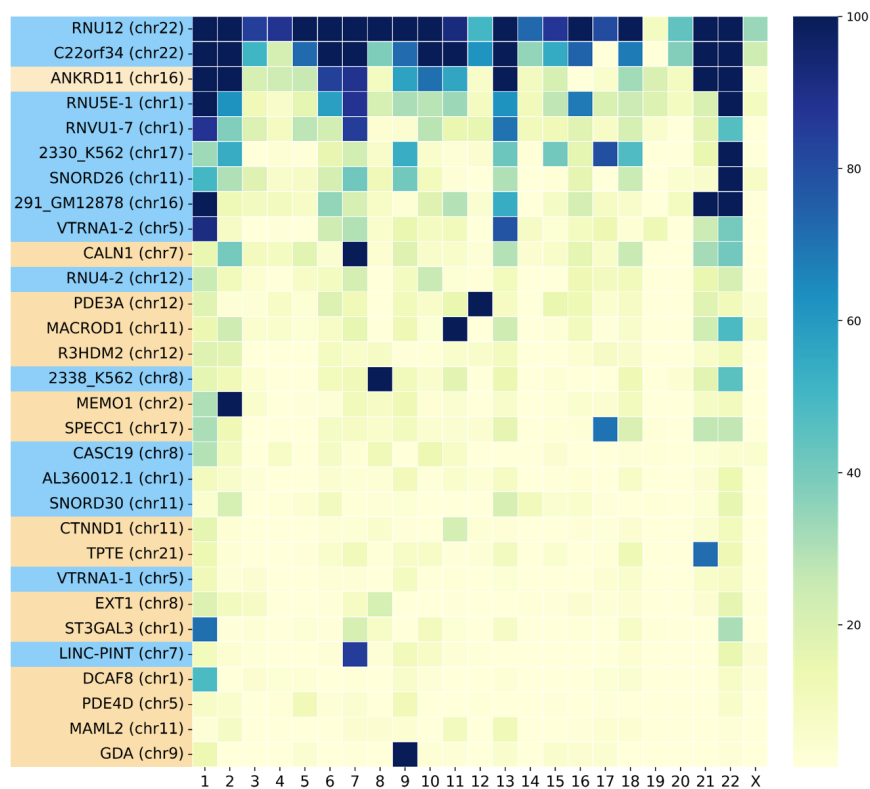


Рис. 1. Отрицательный десятичный логарифм р-значения точного теста Фишера для контактов 30 РНК со всеми хромосомами (отсортированы по убыванию среднего значения). Синим выделены некодирующие РНК, оранжевым – мРНК.

Среди 200 наиболее статистически значимых результатов точного теста Фишера мРНК в меньшинстве - 34.5%, что согласуется с представлением о том, что от них ожидается менее активное участие в регуляторных процессах хроматина, чем от некодирующих.

Использованная литература

1. Li X, Fu XD. Chromatin-associated RNAs as facilitators of functional genomic interactions. *Nat Rev Genet.* 2019 Sep;20(9):503-519. doi: 10.1038/s41576-019-0135-1. Erratum in: *Nat Rev Genet.* 2019 Jul 4;: PMID: 31160792; PMCID: PMC7684979.
2. Lieberman-Aiden E, van Berkum NL, Williams L, Imakaev M, Ragoczy T, Telling A, Amit I, Lajoie BR, Sabo PJ, Dorschner MO, Sandstrom R, Bernstein B, Bender MA, Groudine M, Gnirke A, Stamatoyannopoulos J, Mirny LA, Lander ES, Dekker J. Comprehensive mapping of long-range interactions reveals folding principles of the human genome. *Science.* 2009 Oct 9;326(5950):289-93. doi: 10.1126/science.1181369. PMID: 19815776; PMCID: PMC2858594.
3. Gavrilov AA, Zharikova AA, Galitsyna AA, Luzhin AV, Rubanova NM, Golov AK, Petrova NV, Logacheva MD, Kantidze OL, Ulianov SV, Magnitov MD, Mironov AA, Razin SV. Studying RNA-DNA interactome by Red-C identifies noncoding RNAs associated with various chromatin types and reveals transcription dynamics. *Nucleic Acids Res.* 2020 Jul 9;48(12):6699-6714. doi: 10.1093/nar/gkaa457. PMID: 32479626; PMCID: PMC7337940.
4. Rao SS, Huntley MH, Durand NC, Stamenova EK, Bochkov ID, Robinson JT, Sanborn AL, Machol I, Omer AD, Lander ES, Aiden EL. A 3D map of the human genome at kilobase resolution reveals principles of chromatin looping. *Cell.* 2014 Dec 18;159(7):1665-80. doi: 10.1016/j.cell.2014.11.021. Epub 2014 Dec 11. Erratum in: *Cell.* 2015 Jul 30;162(3):687-8. PMID: 25497547; PMCID: PMC5635824.

Активность нейронов гиппокампа в периоды центрального апноэ у кошек

Лиманская Александра (A. Limanskaya)¹, Левичкина Екатерина^{1,2} (E. Levichkina),
Пигарев Иван (I. Pigarev)¹

¹Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН
²Department of Optometry and Vision Sciences, The University of
Melbourne

lamlampa16@gmail.com

Abstract. Центральное апноэ (ЦА) — остановка дыхания во время сна, длительностью более трёх дыхательных циклов, происходящая по команде из дыхательного центра. Это явление нередко сопровождается различными заболеваниями, но также характерно для нормального дыхания животных и человека. До сих пор нет описания нейронных коррелятов центрального апноэ, а также объяснения механизма возникновения остановок дыхания у здоровых организмов. Гиппокамп - структура, участвующая в процессах, как интеллектуальной, так и висцеральной сферы, в связи с чем можно предполагать его участие в формировании паттерна дыхания и возникновении ЦА. У двух кошек регистрировали импульсную активность нейронов гиппокампа в цикле сон - бодрствование. Усреднённую активность одиночных нейронов в периоды апноэ (70 эпизодов) сравнивали с их импульсацией во время глубокого сна с помощью критерия суммы рангов Уилкоксона. Активность 41 из 244 нейронов гиппокампа во время апноэ достоверно ($p < 0.05$) отличалась от фоновой импульсации в глубоком сне. Полученные данные свидетельствуют в пользу предположения об участии гиппокампа в возникновении центральных апноэ.

Работа поддержана грантом РФФИ №19-04-00215 А

Keywords: центральное апноэ, гиппокамп, нейронная активность, висцеральная теория сна.

Новый интерфейс поиска для НКРЯ: системное описание и реализация¹

С. Гладилин, А. Козеренко

ИППИ им. А.А. Харкевича РАН
Большой Каретный переулок, д.19 стр. 1, 127051 г. Москва, Россия
gladilin@iitp.ru, akozerenko@ruscorpora.ru

Аннотация. В рамках разработки корпусной платформы нового поколения для НКРЯ был предложен новый интерфейс поиска по корпусу. В работе анализируются существующие языки поисковых запросов, особенности поисковых запросов к НКРЯ, предпосылки к построению нового интерфейса. Обсуждаются сложности, возникающие при построении запросов к корпусу, содержащему тексты с неснятой омонимией. Приводится краткое формальное описание нового интерфейса поиска и результаты его тестирования.

Ключевые слова: корпусная лингвистика, корпусные платформы, лексико-грамматические поисковые системы, НКРЯ, омонимия, поисковый интерфейс, веб-интерфейс.

1 Введение

Национальный корпус русского языка (НКРЯ) — крупная коллекция текстов на русском языке общим объемом около 1,5 млрд слов. В настоящее время происходит разработка корпусной платформы нового поколения для НКРЯ. В рамках этой работы ранее был создан прототип системы [1], расширяющий функциональность системы новыми возможностями, среди которых: сортировка по правому/левому контексту с необязательным прореживанием; расчет n-грамм по пользовательскому подкорпусу; поддержка построчной метрической разметки в поэтическом корпусе; поиск по условиям, накладываемым по отдельности на слова в двух языках, в параллельном корпусе; представление корпуса берестяных грамот как параллельного [2]; акцентуационная разметка в синтаксическом корпусе (на основе алгоритма, предложенного в работе [3]) и т.д.

Корпусная платформа нового поколения существенно отличается от старой платформы не только по функциональности, но и по своему внутреннему

¹ Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования No 075-15-2020-793 «Компьютерно-лингвистическая платформа нового поколения для цифровой документации русского языка: инфраструктура, ресурсы, научные исследования».

устройству. При проектировании платформа была разбита на пять принципиально независимых частей:

1. пользовательский интерфейс,
2. программный интерфейс приложения (application programming interface, API),
3. лингвистическое ядро,
4. набора программных адаптеров — интерфейсов доступа к базам данных и поисковым системам,
5. собственно базы данных и поисковые системы.

Наиболее существенной при проектировании с нашей точки зрения стала разработка межкомпонентных интерфейсов (пп. 2, 4 в списке). Вопрос проектирования интерфейсов доступа к базам данных и поисковым системам был ранее рассмотрен в работе [4]. В настоящей работе рассматривается вопрос проектирования программного интерфейса приложения, связывающего пользовательский интерфейс и лингвистическое ядро корпусной платформы.

2 Постановка задачи. Языки построения запросов к БД

Для проведения исследований по базе такого масштаба необходим язык поисковых запросов, позволяющий выделить из всего массива словоупотреблений только словосочетания определенного вида, интересного исследователю. Наиболее известный язык запросов для поиска в языковых корпусах — CQL (англ. Corpus Query Language), разработанный для системы IMS Corpus Workbench [5] и в дальнейшем реализованный во многих других системах, в том числе — NoSketchEngine [6]. Запросы в языке CQL строятся в виде набора условий на лингвистические характеристики (атрибуты) слов, предложений, документов и других структурных единиц, выделяемых в корпусе. Каждый атрибут той или иной структурной единицы (например — слова) может обладать одним или несколькими значениями. Условия на атрибуты соединяются в CQL-запросе при помощи логических операторов И, ИЛИ и НЕ.

Хотя CQL позволяет очень точно задавать сложные формальные запросы, стоит указать на высокий входной порог для желающих воспользоваться им пользователей. CQL — формальный язык со строгим синтаксисом, что требует от пользователя предельной аккуратности в составлении запроса — например, в части соблюдения парности кавычек и скобок. Эта проблема в значительной степени решается при помощи интерфейсов построения CQL-запросов (англ. CQL-builder).

Более существенно, что правильное с точки зрения построения запроса соединение условий при помощи логических операторов И и ИЛИ может быть контринтуитивно для пользователя и часто вызывает путаницу. Так, чтобы найти слова *и* в именительном, *и* винительном падежах, запрос необходимо задать с логическим оператором *ИЛИ* в виде: *им. ИЛИ вин.*

3 Подход к построению запросов, принятый в НКРЯ

Национальный корпус русского языка изначально планировался как продукт для широкой пользовательской аудитории, поэтому для него было принято решение по возможности отказаться от использования формальных языков запросов, особенно — от необходимости задавать связующие логические операторы И и ИЛИ. Данный подход применяется в НКРЯ уже более 15 лет и не является вкладом авторов настоящего доклада, однако, насколько нам известно, не описывался в научной литературе, поэтому дадим здесь его описание.

Условия поискового запроса в НКРЯ автоматически соединяются операторами И или ИЛИ автоматически в зависимости от того, являются ли они **независимыми** или **несовместными**. К примеру, условия “дательный падеж” и “родительный падеж”, примененные к одному и тому же словоупотреблению, можно считать несовместными, поскольку каждое словоупотребление стоит лишь в одном из падежей. Разумеется, существуют такие примеры и такие системы описания, когда одно и то же словоупотребление может быть одновременно атрибутировано разными падежами (см., например, случаи возможной двойной интерпретации: *жду поезд* — вин.п., *жду поезда* — род.п., *жду отца* — можно интерпретировать и как вин.п., и как род.п.), но в первом приближении каждый пользователь рассматривает данные условия как несовместные и потому подразумевает между ними связку “ИЛИ”. Поэтому НКРЯ автоматически использует её, не задавая вопроса пользователю.

Другим примером являются условия “именительный падеж” и “единственное число”. Данные условия можно считать независимыми, поскольку именительный падеж может сочетаться также и с множественным числом, а единственное число — также и с любым другим падежом. Между такими условиями пользователь подразумевает связку “И”, что и реализовано в НКРЯ.

Те же правила действуют и для мета-атрибутов. Так, условия “художественные” и “нехудожественные” тексты в первом приближении несовместны — и имплицитно соединяются связкой “ИЛИ”, в то время как условия “события происходят в XIX веке” и “тип текста: роман” — независимы и имплицитно соединяются оператором “И”.

Опыт многолетней эксплуатации корпусной платформы НКРЯ, в которой реализован описанный подход, показал, что описанное решение соответствует интуитивным ожиданиям пользователей-лингвистов. Для сложных запросов система также предоставляет возможность вручную задать условие на словарные атрибуты с произвольными логическими операторами (но не на мета-атрибуты). Дальнейшее развитие интерфейса системы происходит в соответствии с указанными принципами.

4 Неснятая омонимия при построении запросов к корпусу

Разметка большинства корпусов НКРЯ оставляет омонимию неснятой. Таким образом, каждому словоупотреблению приписывается один или несколько грамматических разборов. При этом атрибуты (род, число, падеж, ...) приписываются не самому словоупотреблению, а отдельному разбору. В то же время, результатом поиска является именно словоупотребление, а не отдельный разбор. Таким образом, возникает вопрос: требуется ли найти словоупотребление, все разборы которого удовлетворяют заданному условию, или те, в которых существует хотя один соответствующий условию разбор? В первом случае математически можно говорить о применении квантора всеобщности, а во втором — квантора существования.

Как и в случае с выбором между связками “И” и “ИЛИ”, эксплицитный выбор между кванторами всеобщности и существования представляет для пользователя значительную трудность и провоцирует ошибки при построении сложных запросов. В языке SQL эксплицитная поддержка кванторов отсутствует, поскольку он не рассчитан на поддержку неснятой омонимии, соответственно, разных разборов не существует и атрибуты приписываются непосредственно словоупотреблению. В языке запросов системы PML-TQ [7] поддержка кванторов присутствует в форме условий, налагаемых на подзапросы, однако представляется, что данный подход слишком сложен для освоения широкой пользовательской аудиторией.

Поэтому кванторы в поисковом интерфейсе НКРЯ также задаются имплицитно. В процессе эксплуатации НКРЯ были рассмотрены две различные гипотезы о том, какая расстановка кванторов лучше соответствует пользовательской интуиции. В соответствии с первой следует во всех случаях имплицитно подразумевать квантор существования. Действительно, характер омонимичных разборов таков, что помимо правильного разбора словоупотреблению может быть приписан неправильный, сколь угодно от него отличающийся (наречию *уже* приписывается омонимичный разбор “существительное *уж* в предложном падеже”, существительному множественного числа *стали* (лемма *сталь*) — омонимичный разбор “глагол *стать* в прошедшем времени” и т.д. Поэтому востребованным является поиск словоупотреблений, хотя бы один из разборов которых соответствует заданным условиям.

Другая гипотеза предполагает, что положительные условия (например, “падеж именительный”) должны имплицитно снабжаться квантором существования (“существует разбор, у которого падеж именительный”), а отрицательные (“падеж **не** именительный”) — квантором всеобщности (“у всех разборов падеж не именительный”). Более строго, условия запроса должны быть разделены на группу положительных и группу отрицательных, после чего к положительным применен общий квантор существования, а к отрицательным — общий квантор всеобщности.

Исходя из теоретических рассуждений обе гипотезы выглядели как отражающие интуиции пользователей, но в разных случаях. Так, если

пользователи преимущественно используют отрицательные условия для описания искомых словосочетаний (например, вместо “1-е или 2-е лицо” указывают условие “не 3-е лицо”), то верна первая гипотеза. Однако обратная связь от пользователей НКРЯ, полученная в процессе разработки и поддержки системы, показала, что чаще всего они применяют положительные запросы для задания условий на собственно искомое словоупотребление и отрицательные — для отсеивания ложных срабатываний, возникающих из-за неснятой омонимии. Такое отсеивание требует наложения условий не на искомый, а одновременно на все иные (омонимичные ему) разборы. Это подтверждает вторую гипотезу. В настоящее время расстановка кванторов при составлении запросов к НКРЯ осуществляется в соответствии с ней.

5 Новый интерфейс запросов к НКРЯ

5.1 Предпосылки к переработке интерфейса запросов к НКРЯ

Национальный корпус русского языка состоит из 17 корпусов, предназначенных для исследований разных типов, каждый из которых отличается некоторыми особенностями при поиске и задании подкорпуса. В процессе развития эти корпуса модифицируются и приобретают всё новые возможности поиска.

Одновременно с этим происходит совершенствование пользовательских веб-интерфейсов. За почти десятилетие, прошедшее со времени разработки интерфейса корпусной платформы НКРЯ предыдущего поколения, технологии существенно шагнули вперед и возможности построения веб-интерфейсов вышли на новый уровень. Поэтому в рамках разработки корпусной платформы нового поколения ставилась также задача создания нового пользовательского интерфейса.

Как правило, разработка пользовательского интерфейса состоит из последовательных этапов, в рамках которых сначала определяются функциональные требования, затем разрабатывается концептуальное решение, затем графический дизайн и т.д. Разумеется, применение такой схемы к каждому из корпусов НКРЯ на каждом этапе развития системы представляется чрезмерным, поскольку все элементы поискового интерфейса укладываются в общую схему: они представляют собой поля ввода поисковых условий, которые, как было описано выше, имплицитно соединяются при помощи логических операторов и кванторов. Поэтому в НКРЯ применяется единожды разработанный графический интерфейс, модифицируемый для каждого корпуса добавлением тех или иных полей ввода. Однако выполнение таких модификаций под каждый корпус требовало исправления программного кода, что с ростом количества корпусов и разнообразия допустимых поисковых условий привело к существенному замедлению реализации новой функциональности корпусов НКРЯ.

Таким образом, перед разработчиками корпусной платформы НКРЯ нового поколения встала задача систематического описания полей ввода условий, требуемых в каждом отдельном корпусе, которое позволило бы автоматически

формировать необходимые элементы графического интерфейса. Преимущество такого подхода также в разделении зон ответственности: содержательное описание необходимой функциональности интерфейса оказывается отделено от конкретной реализации каждого отдельного элемента. Это, в свою очередь, позволяет перейти к более совершенным (и потому сложным) элементам интерфейса, например, интерактивному календарю для ввода дат или онлайн-карте для указания географического региона.

В рамках ранее выполненного на материале СинТагРуса (корпуса НКРЯ с, по-видимому, наиболее богатой разметкой) исследования [8] было предложено описание интерфейса поиска в виде набора полей двух классов. К первому классу отнесены условия, которые характеризуют отдельные словоупотребления в искомом словосочетании: грамматические условия, семантические условия, условия на лемму, условия на словоформу, условия на включенность словоупотребления в микросинтаксическую конструкцию и условия на эллипсис и т.д. Ко второму классу относятся условия на отношения между словоупотреблениями в искомом словосочетании: условия на расстояния между словами и условия на синтаксические, анафорические и лексико-функциональные связи.

5.2 Разработанный метод описания нового интерфейса запросов к НКРЯ

В рамках настоящего исследования разработан подход к формальному описанию интерфейсов поиска и отбора подкорпуса различных корпусов НКРЯ. В качестве базового представления данного описания выбран текстовый JSON. Схема данных описана при помощи языка прототипов (.proto-файлов) стандарта protobuf.

Для построения схемы данных мы проанализировали особенности полей ввода во всех корпусах НКРЯ и выявили следующие типы полей:

1. **Текстовые поля** применяются для задания условий на словоформу, лемму, название произведения и т.д. Для удобства пользователей текстовые поля снабжаются виртуальной клавиатурой, позволяющей вводить русские буквы при отсутствии русской раскладки клавиатуры, а также устаревшие символы в исторических корпусах (ѣ, ѿ, ѹ, ...) и символы иностранных алфавитов в параллельных корпусах (Ä, Ö, ß, à, é, ñ, Ò, Ù, Q, ...).

Кроме того, текстовые поля снабжаются интерактивной подсказкой, позволяющей по первым буквам получить и одной кнопкой ввести в поле целое слово (лемму, словоформу).

2. **Поля для выбора вариантов из списка** могут содержать как сложные иерархические списки, в т.ч. разделенные на несколько страниц (задание типа текста, семантических категорий и т.д.), так и простейшие двухэлементные переключатели (снятая/неснятая омонимия). В зависимости от сложности иерархии внешнее представление этих

элементов интерфейса может значительно различаться. Так, сложный иерархический выбор в НКРЯ реализуется в отдельном всплывающем окне, в то время как простой из двух-трех вариантов — непосредственно в интерфейсе поиска/задания подкорпуса.

Выявлено, что однотипные поля в различных корпусах и даже вариантах поиска по одному и тому же корпусу (например, выбор типа текста для художественных и нехудожественных текстов в основном корпусе) могут существенно различаться по сложности иерархии. Таким образом, иерархическая сложность не является следствием содержательной особенности того или иного поля. Поэтому принято решение о единообразном формальном описании всех полей выбора вне зависимости от их иерархической сложности. Выбор конкретного наиболее удобного для пользователя внешнего вида поля при этом возлагается на программное обеспечение, реализующее графический интерфейс.

Формальное описание поля выбора включает также характеристику следующих особенностей отображаемой иерархии:

- является ли родительская категория суммой всех дочерних;
- требуется ли для поиска пометы дочерней категории имплицитное задание конъюнкции с пометой родительской категории.

Задание этих характеристик зависит от способа разметки корпуса. Проведенный анализ показал, что данных двух характеристик достаточно для описания всех видов иерархической разметки, присутствующих в НКРЯ.

3. **Поля для задания интервалов лет** позволяют задавать условия на год создания текста, год перевода и т.д. Визуально данное поле может быть оформлено в интерфейсе в виде интерактивного календаря того или иного вида.

Поскольку НКРЯ позволяет в разметке текстов также указывать не точный год, а интервал, то поиск текстов, соответствующих заданному условию-интервалу может трактоваться двояко: при одном подходе поиск должен находить все тексты, интервал лет которых должен целиком укладываться в заданный поисковый интервал, при другом — все тексты, интервал лет которых хотя бы пересекается с заданным (но не обязательно целиком укладывается в него). Выбор, какой из этих видов поиска требуется, должен осуществляться при помощи особого переключателя “точное вхождение”, который не требуется включать в разработанную схему формального описания, но который имплицитно подразумевается для каждого поля задания интервалов лет.

4. **Поля для задания интервалов дат** аналогичны полям для задания интервалов лет, но включают еще месяц и число. Они востребованы, например, в газетных корпусах.

5. **Поля для задания интервала чисел** применяются для задания условий на длину текста, число поэтических строк и т.д. Визуально такое поле может быть представлено в интерфейсе в виде графической шкалы.
6. **Поля для задания условий на персону** — на автора текста, переводчика, актера и т.д. являются композитными полями и включают в себя:
 - текстовое поле для задания фамилии, имени, отчества
 - поле для задания интервала годов рождения
 - поле для выбора пола
7. **Специальные типы полей** применяются в отдельных корпусах для задания условий на уникальные для этих корпусов характеристики:
 - словообразование (в основном корпусе);
 - орфоэпические и вокалические условия (в устных и мультимедийных корпусах);
 - условия на формулу и схему поэтической строки строки (в поэтическом корпусе)
 и т.д.

5.3 Тестирование предложенного подхода

В рамках выполненной работы для описанной схемы данных разработан протокол взаимодействия двух компонент корпусной платформы нового поколения — пользовательского интерфейса и лингвистического ядра корпуса. Протокол определяет следующую последовательность операций:

1. для выбранного пользователем корпуса подсистема графического интерфейса запрашивает у лингвистического ядра формальное описание интерфейсов поиска и отбора подкорпуса;
2. подсистема лингвистического ядра формирует и возвращает запрошенное описание;
3. подсистема графического интерфейса отображает форму поискового запроса в соответствии с полученным формальным описанием;
4. по дополнительным запросам лингвистическое ядро возвращает также иерархию значений каждого поля выбора и интерактивную подсказку допустимых для текстового поля слов (лемм, словоформ) для заданной комбинации первых букв;
5. подсистема графического интерфейса отправляет лингвистическому ядру набор поисковых условий, заданных пользователем;
6. лингвистическое ядро постранично возвращает результаты поиска.

Разработанный протокол реализован со стороны лингвистического ядра на языке python, со стороны интерфейса — на языках python и javascript.

Выполнено тестирование разработанной программной системы на закрытых (не доступных стороннему пользователю) стендах. По результатам тестирования установлено, что:

1. Предложенный подход позволяет реализовать все функциональные возможности поискового интерфейса корпусной платформы предыдущего поколения для основного корпуса НКРЯ.
2. Предложенный подход позволяет реализовать дополнительные функциональные возможности, такие как значительное расширение количества полей ввода и включение в запрос более одного условия на связи между словоупотреблениями в искомом словосочетании.
3. Предложенный подход не накладывает ограничений на скорость работы и масштабируемость системы.

На осень 2022 г. запланирован переход на новый интерфейс поиска в основном корпусе НКРЯ.

Литература

1. Гладили С. А., Сизов В. Г., Казенников А. О., Морозов Д. А., Дяченко П. В., Дон О. Р., Козеренко А. Д., Пискунова С. В., Махова А. А., Буйлова Н. Н. Прототип корпусной платформы нового поколения для НКРЯ // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной международной конференции «Диалог». Вып. 21, дополнительный том. С. 1043-1054 Москва: РГГУ (2022).
2. Сичинава Д. В. Корпус берестяных грамот как параллельный // Труды Института русского языка РАН. № 2 (32). С. 92—106 (2022).
3. Сизов В.Г., Подлеская О.Ю. Внесение акцентуационной информации в русский морфологический словарь лингвистического процессора ЭТАП-3 // Информационные технологии и системы - 2011. С. 367-374 (2011).
4. D. Morozov and S. Gladilin, “An abstract model of search index query in the Russian National Corpus”. In: Computational Linguistics and Intellectual Technologies, № 19, pp. 1109-1116 (2020).
5. Christ, O. and Schulze, B. M. The IMS Corpus Workbench: Corpus Query Processor (CQP) User’s Manual. University of Stuttgart, Germany (1994).
6. Jakubíček M. et al. Fast syntactic searching in very large corpora for many languages. In: Proceedings of the 24th Pacific Asia Conference on Language, Information and Computation. С. 741-747 (2010).
7. Pajas P., Štěpánek J. System for querying syntactically annotated corpora. In: Proceedings of the ACL-IJCNLP 2009 Software Demonstrations. С. 33-36 (2009).
8. Тимошенко С. П., Иомдин Л. Л., Гладили С. А., Иншакова Е. С. СинТагРус в составе НКРЯ: новые возможности // «Корпусная лингвистика 2021». С. 31-43 (2021).

Разработка формата разметки и принципов аннотирования для семантического корпуса русского языка на материале «Маленького принца»*

Фролова Т. И.¹ и Рыгаев И. П.²

Лаборатория компьютерной лингвистики ИППИ РАН,
127051 Москва, Большой Каретный переулок, 19, стр.1
¹tfrolova@gmail.com и ²irygaev@gmail.com

Аннотация. В предлагаемой работе изложены основные принципы построения корпуса семантически размеченных структур русских текстов. Эти принципы включают в себя 1) установление соответствия между словами текста и узлами структуры, 2) сохранение в семантической структуре направления синтаксических связей, 3) заполнение валентностей предикатов, как явно, так и имплицитно заполненных в предложении. Кроме того, описана работа по автоматизации построения этого корпуса, перечислены основные группы правил, участвующих в построении семантической структуры. Работа над семантической разметкой ведется коллективом Лаборатории Компьютерной Лингвистики ИППИ РАН. Первая очередь корпуса составляет сказка «Маленький принц» в русском переводе. Объем этого текста около полутора тысяч предложений. Выбор переводного текста объясняется наличием семантических корпусов для аналогичного текста в английском переводе проектах UNL и AMR, что позволит легко сопоставить и взаимно обогатить разметку, выполняемую разными коллективами. Построение семантических структур опирается на результат синтаксической разметки, ведущейся в лаборатории уже более двадцати лет, результаты которой доступны на сайте русского национального корпуса. Таким образом, задача построения семантического корпуса с технической точки зрения сводится к построению правил преобразования синтаксической структуры в семантическую.

Ключевые слова: Корпусная лингвистика, семантика, модель «Смысл ⇔ Текст».

* Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-793 «Компьютерно-лингвистическая платформа нового поколения для цифровой документации русского языка: инфраструктура, ресурсы, научные исследования».

1 Вводные замечания

В лаборатории компьютерной лингвистики ИППИ РАН ведется работа над созданием корпуса семантически размеченных текстов. Первая очередь корпуса представлена текстом перевода Норы Галь на русский язык сказки А. де Сент-Экзюпери «Маленький принц»; этот текст объемом около полутора тысяч предложений был выбран потому, что его английский перевод стал базой для семантической разметки в двух других проектах: разметка в рамках проекта UNL (<http://www.unlweb.net/wiki/LPP>) и проекта AMR (<https://amr.isi.edu/download.html>). Имея в распоряжении один и тот же текст, можно будет легко сравнить подходы и в дальнейшем, если понадобится, построить правила пересчета разметки одного корпуса в другой для взаимного обогащения корпусов с семантической разметкой. Текст сказки ранее был размечен синтаксически и включен в состав корпуса СинТагРус.

Построение семантически размеченного корпуса стало очередной частью семантического проекта, который идет в лаборатории уже несколько лет. Этапы развития этого семантического проекта отражены в работах [1-5]. На текущей стадии работа ведется в двух основных направлениях: во-первых, выработка принципов устройства семантических структур, во-вторых, обеспечение возможности построения этих структур в полуавтоматическом режиме. Разделы 1 и 2 ниже соответствуют этим направлениям работы.

2 Как устроены семантические структуры

Как и для других проектов лаборатории, теоретическим источником для построения семантического представления является теория «Смысл ⇔ Текст» Мельчука [6] и теория интегрального описания языка Апресяна [7]. Семантическая структура строится для каждого предложения отдельно, связи между предложениями в текущей версии корпуса не отражаются. В последующих версиях разметки предполагается добавление этого типа информации.

В нашем проекте реализовано два уровня представления семантики: базовый и расширенный. Базовый уровень представляет смысл предложения. На расширенном уровне в структуру добавляются семантические разложения концептов и выводы. Подробнее о различиях между базовой и расширенной структурой см., например [8]. Семантически размеченный корпус состоит из базовых семантических структур.

Семантическое представление обоих уровней представляет собой граф, в узлах которого стоят семантические элементы, узлы связаны семантическими отношениями. В отличие от синтаксических структур к семантическим графам не предъявляется требование древовидности.

Семантические элементы представляют собой литералы (цепочки символов и числа) или индивиды. Индивиды бывают двух типов: некоторые из них это именованные индивиды, соотносящиеся с уникальными объектами в реальном мире.

Таков, например, индивид France, он соотносится с единственным объектом – Францией. Другие индивиды, анонимные, не представлены в онтологии, но соотносятся с концептами. Концепты – это классы сущностей: предметов, свойств или событий. Например, концепт Rose используется для описания класса роз. Если в предложении встречается слово «роза», то узлом, соответствующим этому слову в семантической структуре, будет индивид класса Rose (такой индивид обозначается в структуре названием класса с числовым индексом, например, Rose_1 или Rose_18). Концепт Seeing используется для описания класса событий видения. Если в предложении встречается глагол «видеть», то узлом, соответствующим этому глаголу в семантической структуре, будет анонимный индивид класса Seeing, не представленный в онтологии, а созданный «на лету» при анализе предложения (обозначается названием класса с индексом, Seeing_2 или Seeing_15). Концепты и именованные индивиды организованы в онтологию при помощи отношения «класс-подкласс» и «класс-индивид». Так, концепт Rose является подклассом концепта более высокого уровня FloweringPlant и наследует все свойства, которые могут быть приписаны надклассу. Индивид France представлен в онтологии как именованный индивид класса EuropeanNation и наследует свойства этого класса. Концепт Seeing является подклассом концепта более высокого уровня Perception и наследует все его свойства. Основные свойства концепта записываются в онтологии в виде списка отношений, характерных для него. Так, концепту Event, надклассу всех событийных концептов, приписано свойство иметь время, которое записывается при помощи отношения hasTime. Это свойство – иметь время – наследуется всеми подклассами класса Event. Валентности концепта также заданы отношениями. Концепту Perception, соответствующему классу событий восприятия, в онтологии приписаны свойства иметь носителя и стимул восприятия – hasExperiencer и hasStimulus, эти свойства наследуются всеми его подклассами, в том числе подклассом Seeing. Список семантических отношений, валентных и невалентных, задан в соответствующем разделе онтологии.

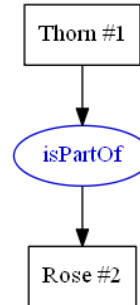
Существенно, что противопоставление концептов и отношений не соответствует противопоставлению имен и глаголов в языке. Классы событий, свойств и явлений, так же как и классы предметов соотносятся с концептами онтологии, а онтологические отношения описывают отношения между концептами.

Подробнее об устройстве онтологии см. [1].

В примере (1) записана базовая семантическая структура словосочетания «шип розы»:

(1) *Шип розы*

Thorn_1
isPartOf Rose_2



Запись `Thorn_1` в этой структуре означает, что в структуре имеется индивид класса `Thorn`. Индекс обозначает, что узлом в структуре является индивид, соответствующий слову с соответствующим номером в предложении. Запись `Rose_2` читается аналогично. Запись `isPartOf` означает, что между узлами `Thorn_1` и `Rose_2` проведено семантическое отношение с таким именем. В семантической структуре (как и в онтологии) принята запись названий классов с заглавной буквы, семантические отношения записываются со строчной.

Мы придерживаемся следующих принципов построения базовой семантической структуры: 1) по возможности сохранять соответствие между словами в предложении и узлами семантической структуры; 2) по возможности сохранять направление семантических связей, соответствующих синтаксическим отношениям; 3) заполнять валентности всех концептов, представленных в структуре, если эти валентности заполнены в предложении. Рассмотрим эти принципы подробнее.

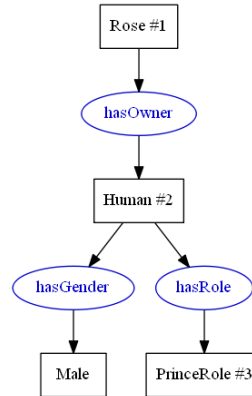
2.1 Соответствие между словами и узлами

Чаще всего каждому значимому слову в предложении соответствует один узел. Но существует несколько основных источников несоответствия между словами и узлами базовой семантической структуры.

Во-первых, для некоторых слов семантические разложения делаются уже на этапе построения базовой структуры, особенно если эти разложения регулярны и тривиальны. Так, в примере (2) ниже слово *принц* представлено в структуре подграфом из трех узлов: `Human_2`, `Male` и `PrinceRole_3`, соединенных отношениями `hasGender` и `hasRole`, который следует читать как «человек мужского пола, имеющий социальную роль принца». Из этих трех узлов только вершинный узел подграфа, `Human_2`, соотнесен в разметке со вторым словом в словосочетании. Остальным узлам присваиваются номера, следующие за номером последнего слова во фразе, и они не соотнесены в разметке ни с каким словом. Узел `Male` не имеет индекса в структуре, поскольку трактуется как именованный индивид из онтологии.

(2) *Роза принца*

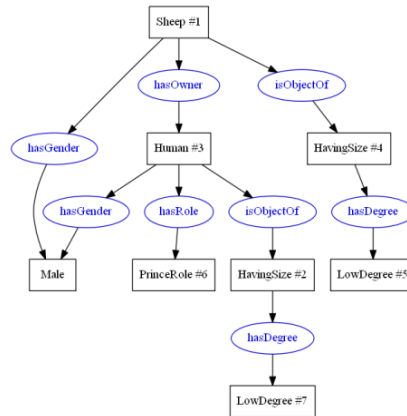
Rose_1
hasOwner Human_2
hasRole PrinceRole_3
hasGender Male



В примере (3) ниже каждое из трех слов в словосочетании представлено более, чем одним узлом. Слово *принц* представлено тем же подграфом, что и в примере (2), слово *маленький* представлено подграфом HavingSize_2 hasDegree LowDegree_9 ('иметь малое значение параметра «размер»'). слово *барашек* представлено подграфом из четырех узлов: Sheep_1, Male, HavingSize_4 и LowDegree_5. Можно заметить, что прилагательное *маленький* и уменьшительный компонент значения слова *барашек* в базовой семантической структуре представлены одинаково.

(3) *Барашек маленького принца*

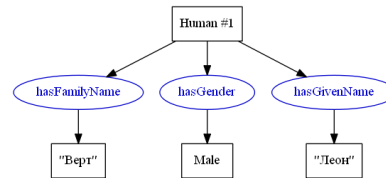
Sheep_1
hasGender Male
isObjectOf HavingSize_4
hasDegree LowDegree_5
hasOwner Human_3
hasRole PrinceRole_6
hasGender Male
isObjectOf HavingSize_2
hasDegree LowDegree_7



Похожее разложение можно видеть в примере (4), только в этом случае среди добавленных узлов есть не только индивиды онтологических классов, но и литералы. Литералы не соотносятся со словами предложения, то есть не имеют номера.

(4) *Леон Верт*

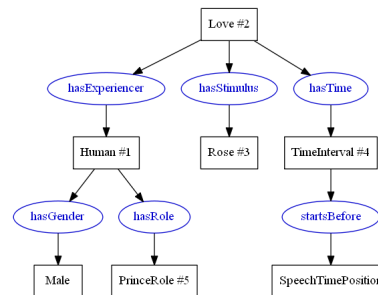
Human_1
hasGender Male
hasGivenName “Леон”
hasFamilyName “Верт”



Кроме того, отдельными узлами в структуре обозначены значения времени, в том числе грамматические. В примере (5) прошедшее время глагола *любил* соответствует в структуре подграфу TimeInterval_4 startsBefore SpeechTimePosition, зависящему от узла, представляющего лексическое значение глагола, по отношению hasTime. Эту часть структуры можно прочесть как «имеет место на таком отрезке временной оси, который начался до момента речи». Узел SpeechTimePosition не имеет индекса, так как трактуется как именованный индивид из онтологии. Выработка стандарта представления временных и видовых значений находится в стадии активной разработки. Некоторые аспекты этой темы обсуждаются в [9].

(5) *Принц любил розу*

Love_2
hasExperiencer Human_1
hasRole PrinceRole_5
hasGender Male
hasTime TimeInterval_4
startsBefore SpeechTimePosition
hasStimulus Rose_3

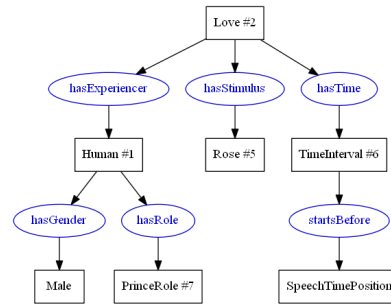


В примерах (2) – (5) были рассмотрены случаи несоответствия количества узлов и слов в предложении, происходящие из-за появления дополнительных узлов в структуре. Есть также случаи, когда источником несоответствия становится то, что слова предложения не соответствуют никакому узлу в семантической структуре. Так происходит с некоторыми служебными словами, например, во многих случаях предлоги не получают соответствующего им узла, можно сказать, что их смысл передается через отношение. Так, в примере (6) предлог *к* не имеет соответствия в структуре. Другой случай, когда слова в предложении не отражаются в структуре это лексико-функциональные сочетания со значениями лексических функций класса OPER-FUNC-LABOR. В примере (6) *испытывать любовь* является сочетанием слова аргумента ЛЮБОВЬ со значением лексической функции OPER1 от этого аргумента – ИСПЫТЫВАТЬ. Такое лексико-функциональное сочетание представлено в структуре одним узлом Love, соотношенным по номеру с синтаксической вершиной сочетания, глаголом ИСПЫТЫВАТЬ. Подробнее о

лексических функциях и работе с аппаратом лексических функций в проектах лаборатории см [10]. Таким образом, семантическая структура предложения (6) *Принц испытывал любовь к розе* совпадает со структурой предложения (5) *Принц любил розу* во всем, кроме номеров узлов. Порядковые номера слов 3 и 4 не приписаны никаким узлам.

(6) *Принц испытывал любовь к розе.*

Love_2
 hasExperiencer Human_1
 hasRole PrinceRole_7
 hasGender Male
 hasTime TimeInterval_6
 startsBefore SpeechTimePosition
 hasStimulus Rose_5



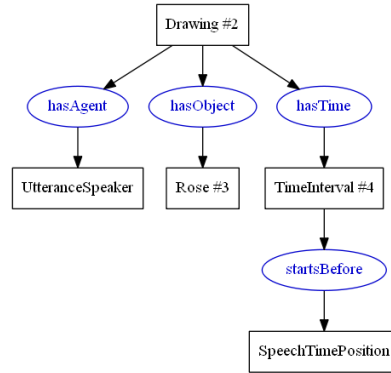
2.2 Сохранение направления связей

Семантические отношения между узлами в структуре имеют то же направление, что у синтаксического отношения между соответствующими словами. Для соблюдения этого принципа удобно пользоваться инверсными отношениями. Отношения в структуре могут записываться двумя способами, прямым и инверсным, так для hasObject инверсное отношение записывается как isObjectOf. Записи A hasObject B и B isObjectOf A эквивалентны.

Сравним связи между узлами Drawing и UtteranceSpeaker в структурах (7) и (8). В примере (7) стрелка hasAgent идет от узла Drawing, соответствующего слову *рисовал*, к узлу UtteranceSpeaker, соответствующему слову *я*, направление стрелки такое же, как у предикативного синтаксического отношения, связывающего узлы *рисовал* и *я* в синтаксической структуре. В примере (8) слово *рисующего*, соответствующее узлу Drawing, зависит от слова *меня*, соответствующего узлу UtteranceSpeaker, по определительному синтаксическому отношению. Семантическое же отношение между двумя узлами сохраняется, говорящий остается субъектом рисования, поэтому в структуре (8) используется инверсное отношение isAgentOf, таким образом направление связи в базовой структуре соответствует направлению синтаксической связи.

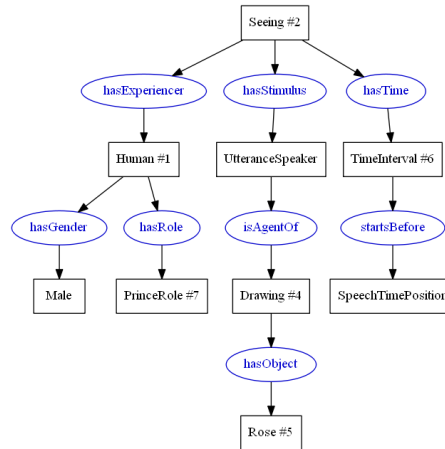
(7) Я рисовал розу

Drawing_2
 hasTime TimeInterval_4
 startsBefore SpeechTimePosition
 hasAgent UtteranceSpeaker
 hasObject Rose_3



(8) Принц видел меня, рисующего розу.

Seeing_2
 hasTime TimeInterval_6
 beforeSpeechTimePosition
 hasExperiencer Human_1
 hasRole PrinceRole_7
 hasGender Male
 hasStimulus UtteranceSpeaker
 isAgentOf Drawing_4
 hasObject Rose_5

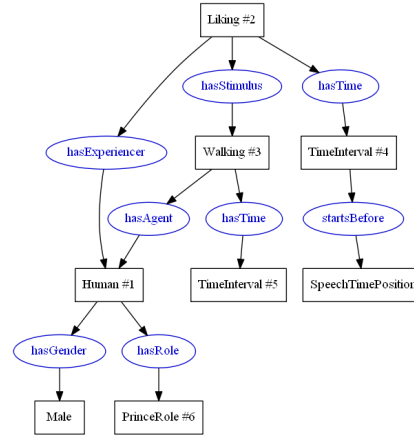


2.3 Заполнение валентностей предикатов, имеющих в предложении

Если в структуре встречается индивид класса, которому в онтологии приписаны какие-то валентности, и при этом из предложения ясно, чем эти валентности имплицитно заполнены, то их заполнение должно быть отражено в структуре. Рассмотрим пример (9). В предложении встречается слово *гулять*, в структуре этому слову соответствует индивид класса *Walking*. В онтологии для этого класса указано, что у него есть валентность, присоединяемая при помощи отношения *hasAgent*, соответствующая тому, кто гуляет. Из предложения ясно, что речь идет о прогулках принца. Значит, в базовой семантической структуре должна присутствовать стрелка *hasAgent* между узлом *Walking* и узлом *Human_1_1*, соответствующим слову *принц*, несмотря на то, что синтаксической связи между словами *гулять* и *принц* не устанавливается.

(9) *Принц любил гулять*

Liking_2
 hasTime TimeInterval_4
 beforeSpeechTimePosition
 hasExperiencer Human_1
 hasRole PrinceRole_6
 hasGender Male
 hasStimulus Walking_3
 hasTime TimeInterval_5
 hasAgent Human_1



3 Техника выполнения разметки

3.1 Общие сведения о технике разметки

Одной из целей текущей стадии проекта является достижение того уровня автоматизации разметки, который сейчас имеется для СинТагРуса: сначала осуществляется первичная **автоматическая разметка**, затем проверка и при необходимости **корректировка вручную построенной структуры** лингвистом-аннотатором.

На вход блока построения семантической структуры подается предложение вместе с результатом синтаксической разметки в том же виде, в каком эта разметка присутствует в СинТагРус'е, то есть в виде дерева зависимостей, в узлах которого стоят слова, а ветви помечены именами синтаксических отношений. Подробнее о синтаксической разметке см [10]. Важно, что синтаксическая структура, которая служит отправной точкой для семантического анализа в силу подробности и разработанности содержит немало семантической информации. Так в словосочетаниях *вопрос принца* и *вопрос наследства* между первым и вторым словом проведены разные синтаксические отношения, в первом случае квазиагентивное, во втором случае первое комплетивное. Синтаксические правила устанавливают в этих случаях разные синтаксические отношения, соответствующие разным семантическим ролям при слове *вопрос*, опираясь на семантическую информацию в комбинаторном словаре ЭТАПа. В каком-то смысле можно сказать, что семантическая разметка не только опирается на синтаксическую, но и начинается еще на этапе построения синтаксической структуры (который в настоящей работе не рассматривается). Кроме синтаксической разметки, на входе семантического блока доступен результат лексико-функциональной разметки – во фразах выделены и связаны различными лексико-функциональными связями

лексико-функциональные словосочетания – и результат восстановления эллипсиса; подробнее об этих двух типах разметки также см. [10].

3.2 Автоматическая разметка

При обработке синтаксической структуры прежде всего восстанавливаются анафорические и кореферентные связи, причем не только связи между вершинами выражений, отсылающих к одному и тому же объекту, но и связи, ведущие к контролерам нулевых актантов, не выраженных в предложении. Так, восстановление такой связи в предложении (9) *Принц любил гулять* происходит сразу после синтаксического анализа, еще в терминах слов и синтаксических отношений, а не семантических узлов и семантических отношений. В рассматриваемом случае это значит, что проводится «квазисинтаксическое» предикативное отношение между словами *гулять* и *принц*, и лишь на более поздних этапах преобразования по правилам перевода предикативное отношение в данном лексическом контексте превращается в *hasAgent*, а слова *принц* и *гулять* заменяются соответствующими семантическими узлами. Описание правил такого восстановления нулевого субъекта приводится в [11]. Об автоматическом разрешении других типов анафоры в ЭТАПе подробнее см. [12]; об анафорической разметке см. также [10].

В начале основного этапа обработки работают правила порождения узлов, соответствующих временным грамматическим значениям и привязка этих узлов к моменту речи. В это же время производится первичная обработка лексико-функциональных сочетаний и некоторые перестройки структуры, например, в конструкциях с притяжательными прилагательными; так словосочетание с определительным синтаксическим отношением *Васина победа* превращается в сочетание *победа Васи*, где от *победа* к *Васи* проведено квазиагентивное синтаксическое отношение.

Затем следует основной этап перевода слов и отношений. Перевод слов может заключаться в замене слов на один узел или на несколько узлов, связанных семантическими отношениями. Так, слово РОЗА заменяется на один узел – индивид класса *Rose*, а слово ПРИНЦ заменяется на комбинацию из узлов *Human*, *PrinceRole* и *Male*, связанных соответствующими отношениями, подробнее см комментарий выше перед примером (3). Перевод валентных отношений зависит от слова и соответствующего ему семантического узла, поэтому не существует универсального правила перевода валентных отношений. Так, например, для глагола ВИДЕТЬ соответствующее правило переводит отношение с прямым дополнением как *hasStimulus*, а для глагола РУБИТЬ связь с прямым дополнением переводится как *hasObject*.

На заключительном этапе осуществляется дежурный перевод непереверенных узлов и отношений там, где это необходимо, а затем стирание слов исходного предложения, оставшихся без перевода, и связанных с ними отношений. В первую очередь речь идет о вводных словах, которые не снабжены переводом на текущем этапе проекта. Так, во фразе *Итак, я исправляю посвящение* слово ИТАК остается без перевода и на заключительном этапе построения базовой структуры стирается вместе с идущим к этому слову вводным синтаксическим отношением.

Семантическая структура этой фразы будет совпадать со структурой фразы *Я исправляю посвящение*.

3.3 Формат хранения семантической разметки

Семантическая разметка сохраняется вместе с синтаксической в специальном XML-формате, известном как Tagged Text [13]. Чтобы это было возможно, формат был дополнен новыми тэгами.

Внутри тэга S (предложение) добавился тэг SEM. Сам этот тэг не содержит собственных атрибутов и служит лишь для группировки семантической структуры в одном месте и отграничения её от описания синтаксиса.

Тэг SEM внутри себя содержит теги N, каждый соответствует одному семантическому узлу. Тэг N имеет следующие атрибуты:

1. ID – номер узла. Для узлов, соответствующих словам, совпадает с номером слова (в тэге W). Для остальных – номер по порядку, начиная с номера последнего слова + 1.
2. TYPE – тип узла. Может содержать значения:
 - a. named – узел представляет собой именованный индивид, представленный в онтологии
 - b. anonymous – узел представляет собой индивид класса (концепта), представленного в онтологии. Это самый частый случай. Большинство узлов в семантической структуре обозначают анонимных индивидов.
 - c. literal – узел представляет собой числовое или символьное значение.
3. VALUE – значение узла. Для узлов типа named указывается имя индивида из онтологии. Для узлов типа anonymous – имя класса из онтологии, которому принадлежит индивид. Узлы типа literal могут быть двух видов – число (целое или вещественное) или строка символов в двойных кавычках.

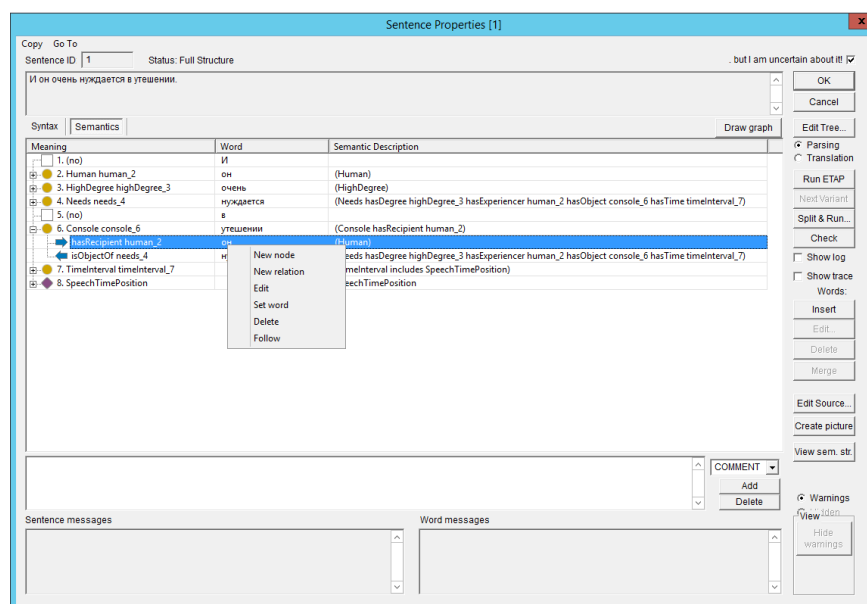
Тэг N внутри себя может содержать теги R, соответствующие отношениям, идущим от данного узла к другим узлам семантической структуры. Тэг R имеет два атрибута:

- a. LINK – имя отношения из онтологии
- b. TO – номер узла, в который направлено отношение

3.4 Редактирование структур

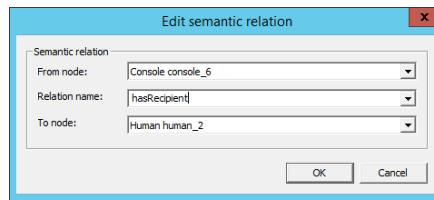
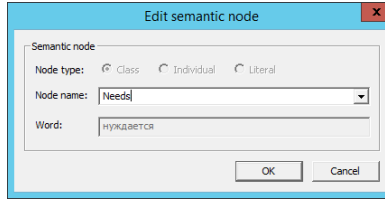
Для редактирования построенных автоматически семантических структур разработана новая версия редактора Structure Editor [13] с поддержкой семантической разметки. Она позволяет добавлять узлы в семантическую структуру, стирать их из структуры, проверять соответствие добавленных узлов их описанию в онтологии, а также проводить семантические отношения между узлами структуры и устанавливать или менять соответствия между словами предложения и элементами семантической структуры.

Ниже представлен пользовательский интерфейс редактирования предложения на примере предложения из текста «Маленького принца» *И он очень нуждается в утешении*. В одном и том же окне можно переключаться между синтаксисом и семантикой при помощи кнопок-переключателей слева сверху. Само окно семантической структуры отображает таблицу узлов, в которой представлено а) значение узла, б) слово, которому узел соответствует, и в) некое более подробное семантическое описание. Узлы можно раскрывать, чтобы увидеть, с какими другими узлами связан данный узел. Причём отображаются как исходящие, так и входящие отношения. Узлы помечаются разными значками в зависимости от их типа (а отношения – в зависимости от направления). Если слову не соответствует никакой узел, то в первой колонке вместо значения отображается (no) и белый квадрат в качестве значка. Семантическое описание в третьей колонке представляет собой выражение на языке Эталог [14], включающее в себя сам узел и исходящие отношения до его ближайших узлов, то есть до тех узлов, над которыми данный узел «доминирует».

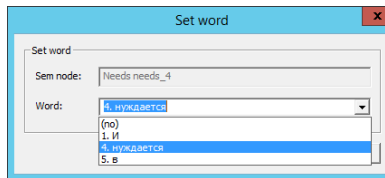


Само редактирование осуществляется при помощи вызова контекстного меню, элементы которого позволяют создавать новые узлы и отношения, редактировать у удалять существующие, а также менять привязку семантического узла к слову. Последний пункт “Follow” позволяет «перейти по стрелке» – он выбирает в таблице узел, на который указывает отношение.

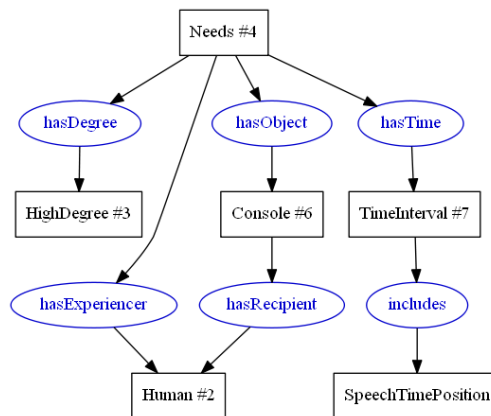
Ниже представлены диалоги создания/редактирования узлов и отношений. При вводе проверяется наличие классов, индивидов и отношений в онтологии, также их можно выбирать из списка. Тип узла определяется автоматически.



А следующий диалог позволяет менять привязку семантического узла к слову. Тут можно выбрать другое слово, к которому пока не привязан никакой семантический узел, либо указать (no), чтобы отвязать узел от слова.



Кнопка “Draw graph” в правом верхнем углу позволяет отобразить семантическую структуру в виде графа. В частности, данная структура будет выглядеть так:



Кнопка “Run ETAP” в режиме Parsing пересоздаёт синтаксическую разметку автоматически, не трогая семантику. А в режиме Translation, наоборот, пересо-

здаёт семантическую разметку, не трогая синтаксис. Таким образом, второй режим можно использовать для добавления семантических структур в уже готовый синтаксически размеченный корпус с исправленными вручную синтаксическими структурами.

4 Заключение

В работе рассмотрены основные принципы и способы построения семантического корпуса в рамках проекта лаборатории компьютерной лингвистики ИППИ РАН. В перспективе корпус может быть использован для машинного обучения, автоматического анализа содержания текстов. Он является важным шагом в направлении построения модели понимания для искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Богуславский И.М., Диконов В.Г., Тимошенко С.П. Онтология для поддержки задач извлечения смысла из текста на естественном языке // Информационные технологии и системы (ИТиС'12). Сборник трудов 35-ой конференции молодых ученых и специалистов ИППИ РАН (г. Петрозаводск, 19-25 августа 2012 г.). М.: ИППИ, 2012. С. 152-160.
2. Boguslavsky I.M., Dikonov V.G., Iomdin L.L., Timoshenko S.P. Semantic representation for NL understanding // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. По материалам ежегодной Международной конференции «Диалог» (2013). М.: Изд-во РГГУ, 2013. Вып. 12. Т. 2. С. 124-136.
3. Boguslavsky I.M., Dikonov V.G., Iomdin L.L., Lazursky A.V., Sizov V. G., Timoshenko S.P. Semantic Analysis and Question Answering: a System Under Development // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной Международной конференции «Диалог» (г. Москва, 27–30 мая 2015 г.). М.: Изд-во РГГУ, 2015. Вып. 14(21). Т. 1. С. 62-79.
4. Boguslavsky I.M., Frolova T.I., Iomdin L.L., Lazursky A.V., Rygaev I.P., Timoshenko S.P. Knowledge-based approach to Winograd Schema Challenge // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной международной конференции «Диалог» (г. Москва, 29 мая — 1 июня 2019 г.). М.: РГГУ, 2019. Вып. 18(25). С. 86-103.
5. Богуславский И. М. Семантический анализ с опорой на умозаключения в функциональной модели языка. *Вопросы языкознания*, 2021, 1: 29–56.
6. Мельчук И.А. Опыт теории лингвистических моделей «Смысл–Текст». М.: Школа «Языки русской культуры», 1999. 346 с.
7. Апресян Ю.Д. Интегральное описание языка и системная лексикография // Избранные труды. Т. II. М., Школа "Языки русской культуры", 1995, 766 с.
8. Boguslavsky I.M., Frolova T.I., Iomdin L.L., Lazursky A.V., Rygaev I.P., Timoshenko S.P. Semantic Analysis with Inference: High Spots of the Football Match (Семантический анализ с логическим выводом: острые моменты футбольного матча) // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной международной конференции «Диалог» (г. Москва, 30 мая — 2 июня 2018 г.). М.: РГГУ, 2018. Вып. 17(24). С. 124-142.

9. Timoshenko, S., Formal Representation of Temporal Expressions // *EPiC Series in Language and Linguistics*, 4, 2019. С. 84-94.
10. Иншакова Е.С., Иомдин Л. Л., Митюшин Л. Г., Сизов В. Г., Фролова Т. И., Цинман Л. Л. СинТагРус сегодня // *Труды Института русского языка им. В. В. Виноградова. М., 2019. Вып.21. с.14–40.*
11. Маракасова А.А. Автоматическое разрешение анафоры в русском тексте: случай нулевого субъекта // *Информационные технологии и системы 2016 (ИТиС'2016). Труды 40-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН. СПб., 2016. . С. 431-436.*
12. Inshakova E.S. An anaphora resolution system for Russian based on ETAP-4 linguistic processor // *Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии По материалам ежегодной международной конференции «Диалог» (2019) Выпуск 18. С. 249-261.*
13. Iomdin, L., Sizov, V. Structure Editor: A Powerful Environment for Tagged Corpora. *Research Infrastructure for Digital Lexicography (2009)*
14. Rygaev I. Etalog - a natural-looking knowledge representation formalism // *Труды школы-конференции ИТиС 2018.*

Different Types of Metaphor in the Mental Lexicon: The Case Study of Russian Verbs¹

Alexander Orlov¹, Kirill Koncha¹, Valentina Apresyan^{1,2}

¹HSE University, ²The V.V. Vinogradov Russian Language Institute of the Russian Academy of Sciences
alexander.orlov98@gmail.com

Abstract. In most psycholinguistic studies investigating the storage of polysemous words in the mental lexicon, metaphor is approached as a discrete, homogenous category. At the same time, theoretical linguistics view polysemy as a continuum with a large number of intermediate cases and subtypes. If we translate *the metaphor as a continuum* approach into psycholinguistic terms, it could be hypothesized that significant storage and processing discrepancies should exist between different sub-types of metaphorical senses depending on their semantic proximity to the literal sense. This research focuses on two different types of metaphor: proximal and distal, defined as such based on their semantic proximity to the literal sense. We conducted two psycholinguistic experiments targeting these two types of metaphor with the purpose of discerning their discrepancies in processing and storage. Our results suggest that metaphor does not form a discrete homogenous category and various sub-types of metaphor are retrieved from the mental lexicon in different ways.

Keywords: metaphor, storage patterns, polysemy.

1 Introduction

1.1 Theoretical Background

Understanding mechanisms behind the storage pattern of a particular linguistic item or category is crucial for developing comprehensive theories about all the other psycholinguistic aspects of the given item or category. One linguistic category that is rather understudied in this regard is polysemy.

Polysemous words bear several semantically distinct senses. Polysemy is not to be confused with homonymy: homonyms are characterized by meanings that are unrelated on a synchronic level and are a result of linguistic coincidence (cf. лук₁ meaning ‘onions’ and лук₂ meaning ‘bow’), whilst polysemous senses are related to the literal

¹ This work was partially carried out within the framework of the grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within Agreement No. 075-15-2020-793: “Next-generation computational linguistics platform for the Russian language digital recording: infrastructure, resources, research”.

sense or to each other via semantic shifts (cf. *голова* ‘head’ signifying either a body part or a leader). One of the most widely spread types of semantic shifts is metaphor.

Metaphorical shift is based on similarity. In [1] metaphor is defined via a change of semantic domains: one domain is structured through another with the establishment of correspondences between the elements of the two domains. Examples of a metaphor include *My computer died* in the sense of ‘My computer ran out of power’ (a device is envisioned as a living creature) or, conversely, *I have run out of charge* in the sense of ‘I am tired’ (a person is envisioned as a device).

The question of how such senses are stored in our brain is central in modern psycholinguistics. When we model the storage of words, we use a psycholinguistic construct called “mental lexicon.” It is often said that particular words or meanings occupy *slots* in the mental lexicon (ML). Nevertheless, it is universally agreed that when processing speech, not all meanings are directly obtained from the mental lexicon - some meanings are *calculated* ‘on the fly’ with the help of other meanings stored in ML. Thus, when we analyze processing and storage patterns of a particular linguistic item, we should discern whether this meaning is directly accessible via ML, or it should be derived from another meaning in ML with the help of some rules.

If several meanings of an ambiguous word each have their own slots in the mental lexicon, we call this *separate storage*. Conversely, when several meanings of a word lack distinct slots in the mental lexicon and are accessed from the same slot via some rules, we talk about them being stored *together* (*conjoint storage*).

As of now, there exists no universally accepted theory on the storage of metaphor in the mental lexicon. Some researchers claim that metaphors are stored together with literal senses [2-4], while others argue that metaphorical senses are stored separately [5-7]. All the works cited above share in common the fact that they approach metaphorical senses as a discrete and homogeneous category, presuming that **all** metaphors should be found to have the **same** storage pattern in the mental lexicon.

Nevertheless, such assumption does not find support in the current theoretical literature on the topic. In fact, most modern semanticists who study lexical ambiguity describe it not as a collection of discrete homogeneous categories such as metaphor or metonymy, but as a gradual continuum with a large number of sub-divisions and intermediate cases [8]. Followers of this approach suggest that, given the gradual, continuous nature of polysemy, different types of figurative usages may exhibit different properties, depending on their *semantic proximity* to the literal sense (i.e. the semantic overlap between the two senses) [8], [9].

Graduality of polysemy was partially corroborated in [9]. This paper primarily focused on a different type of semantic shift – metonymy, which, unlike metaphor, is based on contiguity. [9] featured a *semantic clustering task* experiment where participants were asked to classify a number of sentences containing the same word in different senses into virtual baskets so that sentences with the same perceived sense were put in the same basket. The sentences contained the following types of senses: literal, metaphorical, so-called proximal metonymic and distal metonymic. The authors argued that proximal metonymies presented in the experiment by a very common *whole-part* shift (*sad person* - *sad eyes*) were semantically closer to the literal sense

than distal metonymies built upon several less regular and less predictable shifts such as temporal, causal or resultative (e.g., *sad person - sad times*; *sad person - sad news*).

Because proximal metonymies were grouped together with the literal sense and with each other more often than with distal metonymies and metaphors, the results of the experiment corroborated the idea that metonymic usages do not form a discrete homogeneous category and that different types of metonymy are represented differently in the mental lexicon, depending on their cognitive proximity to the literal sense.

The view of polysemy as a vague and gradual continuum was also indirectly corroborated in [10-12].

These findings are of great interest to us as they provide further ground for speculation that metaphors might not form a homogenous category, in the same way as metonymy. As of now, we are unaware of any psycholinguistic works on metaphors that tried to prove the heterogeneity of this category by comparing and contrasting metaphorical stimuli at different levels of semantic proximity to the literal sense.

1.2 Current study

Hypothesis. We hypothesize that metaphor does not form a homogeneous category and that different subtypes of metaphor are stored and processed differently in the mental lexicon, depending on their cognitive proximity to the literal sense.

In order to try this hypothesis, we must first determine some formal criteria to measure cognitive proximity between metaphorical and literal senses. Then we must utilize these criteria to identify and describe (at least) two types of Russian verbal metaphor different in their semantic proximity to the literal sense. Subsequently, we should conduct a series of psycholinguistic experiments targeting different aspects of storage and processing of these two types of metaphor with the purpose of discerning and describing significant discrepancies between the two.

Object of the study. To corroborate our hypothesis we had to identify and describe two types of metaphor with different degrees of semantic proximity to the literal sense.

Current literature on the topic [11], [9], [13] suggests the following factors for measuring semantic proximity between word senses: *semantic overlap* (number of common sems between the senses), *shift regularity* (number of words that undergo this shift), *shift systematicity* (number of other words from the same semantic cluster (synonyms, antonyms, etc.) that demonstrate a similar change of meaning), *structural comparability* (whether the same argument structure and morphosyntactic restrictions as in the literal sense are retained), the so-called linguistic ambiguity test, or *possibility of conjoining with literal usages* (whether a given sense can be conjoined to the literal sense with the use of conjunction *and*).

Following terminology from [9], we call these two types of metaphor *proximal* and *distal* metaphor.

Proximal metaphor is defined as classical conceptual metaphor [14]. Such metaphors are expected to be closer to the literal sense, since they share a fair amount of

common semantic elements with the literal sense as a result of conceptual mapping. Proximal metaphor can be illustrated by the use of the verb *идти* ‘to walk’ as in *По небу шли облака* ‘Clouds were moving across the sky (lit. walking across the sky)’.

Conversely, distal metaphor is typified by bleached metaphorical senses, which lose most of their semantic components in the process of grammaticalization [15]. These metaphors are expected to have a greater distance from the literal sense. Distal metaphor can be illustrated by the use of a verb *идти* ‘to walk’ in *Урок идёт* ‘The lesson is ongoing (lit. the lesson walks)’.

We expect these two types of metaphor to be stored and processed differently because of significant differences in their semantic proximity.

2 Experiments

In order to identify significant differences in processing and storage between the two relevant metaphorical types, we conduct a series of psycholinguistic experiments targeting two different aspects: storage and processing. These experiments are *sensicality judgment task*, *eye-tracker while reading*, and they are described below.

To eliminate part-of-speech-related effects demonstrated in [11], in this study we focus solely on metaphor in verbs.

2.1 Sensicality judgment task

Overview. *Sensicality judgment task* is a type of experiment where participants are presented with stimuli, which they need to evaluate as either meaningful or meaningless. This format of experiment normally examines the perception of stimuli outside of a broad natural context. It is primarily geared at understanding the objective storage patterns behind the presented stimuli.

Procedure. In our experiment, we present participants with isolated pairs of phrases consisting of an infinitive of a verb and a noun-argument. In total there were 32 phrases, comprising 16 pairs. Each pair featured the same verb, but two different nouns with one noun triggering literal interpretation, and the other noun – metaphorical interpretation (e.g., *забирать посылку* vs. *забирать энергию* ‘pick up a parcel vs. consume energy (lit. pick up energy)’, *оставить багаж* vs. *оставить рубец* ‘leave luggage vs. leave a scar’). In one half of these pairs interpretation was proximal metaphorical (cf. examples with *забирать*) and in the other half – distal metaphorical (cf. examples with *оставить*). All the stimuli were divided in two experimental lists so that each verb was featured only once in each experimental list. In addition to 32 stimuli, experimental lists contained 9 meaningful fillers and 38 meaningless ones. Factors such as frequency and word length were controlled. In this experiment both reaction times and accuracy rates from different types of stimuli were recorded.

The experiment was conducted online, on the pcIBEX platform [16] on 120 participants, who all were adult native speakers of the Russian language without serious mental conditions.

Analysis. Four regression models were built: two for proximal metaphoric-literal pairs, and two for distal metaphoric-literal pairs. In two models, the dependent variable was the correctness of the answer about the meaningfulness of stimulus phrases, and in the other two - the logarithmically transformed response time to stimulus phrases. The models were evaluated using the lme4 R package. All models included independent variable of shift type and random effects for participants and stimuli.

Metaphors were shown to be processed slower than literal senses in both *literal-proximal metaphoric* and in *literal-distal metaphoric* pairs, but the difference in the former pair was much more prominent than in the second pair. See [17] for detailed statistics.

2.2 Eye-tracker while reading

Overview. *Eye-tracking while reading* is a type of experiment where participants are to read pieces of text and occasionally answer questions monitoring for their focus. While doing so, their eye-movement is tracked with an eye-tracker, a special non-intrusive device with a camera which uses center of the pupil and infrared/near-infrared non-collimated light to create corneal reflections (CR). See more in [18].

Such experiments study processing of lexical items in their natural context.

Procedure. In our experiment, participants were presented with sentences containing the phrases from the previous study. In total there were 32 sentences, comprising 16 pairs, where one sentence contained a verb utilized in the literal sense, whilst other contained the same verb in a metaphoric (either proximal or distal) sense. The first part of each sentence was intentionally ambiguous, allowing for either interpretation of a verb, with a disambiguator coming right after the verb in the form of a noun-argument. As in the previous experiment, half of the sentences contained literal and proximal metaphorical usages, and half – literal and distal metaphorical. One example of such pair is *Моя жена наконец-то вышла из ресторана, в котором она провела два часа* 'My wife finally came out of the restaurant, in which she had spent two hours' vs. *Моя жена наконец-то вышла из депрессии, в которой она пробыла два месяца* 'My wife finally came out of depression, in which she had spent two months.' There was also three times more fillers than stimuli in the experiment.

The experiment was carried out with the help of HSE's Center for Language and Brain. The number of subjects tested for the experiment was 64, but only 61 turned out to be valid subjects. All valid participants were adult native speakers of the Russian language without serious mental conditions.

Analysis. We analyzed three regions in stimuli sentences: target verb, the following disambiguating noun, and a similar word after an unambiguous noun shared for both sentences in the pair.

We examined three reading time measures as well as one reading quality measure at the critical regions described above: *first fixation duration* (the duration of the first fixation that is within an interest area during first pass reading), *gaze duration* (the summation of the time spent fixating an interest region from the first entrance into the

region until leaving it in either direction during first pass reading), *total reading time* (the summation of the duration across all fixations on an interest region), and *regressions in* (the proportion and number of trials on which there was a regression made to the area after successfully leaving that area in a forward direction during first pass reading). No significant differences between sentences with different senses were found.

3 Interpretation

In order to discern significant differences in processing and storage between various subtypes of metaphor, we conducted two experiments, involving three types of senses: literal, proximal metaphorical and distal metaphorical. Since we used phrases from the first experiment in the second experiment, the results of the two experiments are directly comparable.

The eye-tracker while reading results showed no significant difference in real-time processing of the senses, thus suggesting that neither proximal nor distal metaphors have their own separate slots in the mental lexicon, but are rather stored together with the literal sense, similarly to (proximal) metonymy.

Yet, the data from *sensicality judgment task* demonstrates that, unlike proximal metonymy from [9], metaphorical senses are not perceived as indistinguishable from the literal sense, implying they are not accessed directly from the slot, yet derived according to some rules. Furthermore, a marked difference between proximal and distal metaphors in terms of their relation to the literal meaning was observed, as both quantitative and qualitative effects were shown to be more prominent in proximal metaphor than in distal metaphor.

Sensicality judgment task experiments are different from experiments involving eye-tracker in the following way: the former show words outside of their natural context, which may hinder several psycholinguistic processes, including calculation of one sense via the other [19], [14]. Therefore, the increased reaction times in sensicality judgment task for the metaphorical usages are indicative of the fact that metaphors do undergo some re-structuring or re-calculations, unlike proximal metonymies from [9]. Notably, the time difference is wider for *proximal metaphor-literal* pairs than for *distal metaphor-literal* pairs. This observation is, in turn, indicative of the difference in derivation procedure for proximal and distal metaphors.

The increased number of “no” responses on the metaphorical usages, compared to the literal sense, further demonstrate that the metaphors are perceived as less conventional and readily interpretable than literal senses. In other words, this observation means that metaphors are not stored as ready-to-use senses and accessing them in the mental lexicon can be troublesome at least for some speakers. Since there were significantly more negative answers on the proximal metaphor, compared to distal metaphor, one may conclude that the former is less conventional and harder-to-analyze than the latter.

We believe that the above-described differences between proximal and distal metaphor could be attributed to the relation of these two senses to the literal one. The

relation between distal metaphor and literal sense can be defined as **inclusion**, while the relation between proximal metaphor and literal sense – as **interception**.

To expand on this, the interpretation of distal metaphor is characterized by two aspects: (1) it is narrower (simpler) than the literal sense, i.e., it includes fewer semantic components than the literal sense; (2) the few components it consists of are all also present in the literal sense [15]. Hence, the transition from the source representation to the distal metaphor requires the speaker to perform several **deletion** operations, resulting in an interpretation that effectively constitutes part of the previous interpretation. Consider the sense of the verb *идти* ‘walk’ in *идёт урок* ‘the lesson is in progress (lit. the lesson walks)’, which retains the components of dynamicity and progress, also present in the literal sense, but is devoid of the physical component referring to the movement of one’s feet, one’s location in space and various other physical parameters.

Conversely, the relation between proximal and distal metaphor is rather more complicated. W. Croft [1] suggests that conceptual (*proximal*, in our terms) metaphor retains some semantic components of the literal sense, while also gaining some new semantic components pertaining to a different semantic domain. This procedure could be termed as **re-arrangement**. The result is an interpretation that both overlaps with the original one and differs from the original one significantly. Consider the verb *идти* in *страна идёт к катастрофе* ‘the country walks towards the catastrophe’. This interpretation is intuitively seen as more cognitively close to the literal sense due to a larger number of shared semantic components (in absolute numbers); however, derivation of a figurative sense requires some unconventional re-arrangement, such as re-rendering physical space into abstract state of affairs, and physical actors, moving between specific landmarks, into abstract entities, moving between abstract reference points.

It can be argued that deletion is a more conventionalized or predictable operation, as compared to re-arrangement. This statement finds support in [20], [1], [14]. Thus, we have to conclude that what we termed *proximal metaphor* can actually prove to be more **remote** from the literal sense than the so-called *distal metaphor*, meaning that some change in terminology might be necessary. We plan to explore these issues in our further research.

4 Conclusion

Our results suggest that our main hypothesis is borne out -- metaphor does not form a discrete, homogenous category from the psycholinguistic point of view, with different metaphorical senses demonstrating different storage patterns.

Corroborating the heterogeneity of metaphor has serious implications for experimental linguistics, as now it can be argued that previously published works on the storage patterns of metaphors do not contradict, but instead complement each other. To elaborate on this, given our conclusions, we believe that opposing results from preceding experiments can be explained by the use of different types of metaphors as the stimuli in those experiments, entailing that these experiments just report on differ-

ent parts of the continuum. As we demonstrated, some parts of the continuum also perform differently in different experimental tasks, with some experiments suggesting separate storage, and others favoring conjoint storage. Thus, our work can serve as an integration point for previous studies on the topic, as we attempt to establish a common ground for building a new, more comprehensive theory that can account for different types of metaphor.

Our study also has a serious methodological implication. Our results suggest that all the experiments involving metaphor should control not only for standard factors such as frequency or part of speech, but also for the type of the shift, viewing metaphor not as a homogenous category, but as a set of smaller categories that can be stored, and/or processed differently, depending on the subtype of the shift.

References

1. Croft. W. The role of domains in the interpretation of metaphors and metonymies Metaphor and metonymy in comparison and contrast, 161-205 (2002).
2. Frazier, L., & Rayner, K. Taking on semantic commitments: Processing multiple meanings vs. multiple senses. *Journal of memory and language*, 29(2), 181-200 (1990).
3. Frissson S., Pickering M. J. The processing of metonymy: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25, 1366–1383 (1999).
4. Beretta, A., Fiorentino, R., and Poeppel, D.. The effects of homonymy and polysemy on lexical access: an MEG study. *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 24, 57–65 (2005).
5. Klein D. E., Murphy G. L. The Representation of Polysemous Words. *Journal of Memory and Language*, 2 (45), 259–282 (2001).
6. Klein D. E., Murphy G. L. Paper has been my ruin: Conceptual relations of polysemous senses. *Journal of Memory and Language*. 4 (47), 548–570 (2002).
7. Pylkkänen, L., Llinás, R., & Murphy, G. L. The representation of polysemy: MEG evidence. *Journal of cognitive neuroscience*, 18(1), 97-109, (2002).
8. Apresjan Ju. D. *Leksicheskaja semantika*. Nauka. Moscow. (1974).
9. Apresjan V., Lopukhina A., Zarifyan M. Representation of Different Types of Adjectival Polysemy in the Mental Lexicon. *Frontiers in Psychology*, 12 (2021)
10. Jager B., Cleland A. A. Connecting the research fields of lexical ambiguity and figures of speech: Polysemy effects for conventional metaphors and metonyms. *The Mental Lexicon*, 1 (10), 133–151 (2015).
11. Lopukhina A., Laurinavichyute A., Lopukhin K., and Dragoy O. The mental representation of polysemy across word classes. *Frontiers in psychology*, 9 (2018).
12. Yurchenko A., Lopukhina A., Dragoy O. Metaphor Is Between Metonymy and Homonymy: Evidence from Event-Related Potentials. *Frontiers in Psychology*, 11, (2010).
13. Orlov A. V. Metaphor and bleaching in the mental lexicon: eye-tracker study. Master's thesis, 'HSE' University, (2022).
14. Lakoff, G., & Johnson, M. Conceptual metaphor in everyday language. *The journal of Philosophy*, 77(8), 453-486 (1980).
15. Abraham W. How far does semantic bleaching go? *Grammatical relations in change*, 15-64 (2001).
16. Zehr, J., & Schwarz, F. PennController for Internet Based Experiments (IBEX) (2018).
17. <https://github.com/kirillkoncha/ProximalandDistalMetaphors>

18. Witzner Hansen, Dan; Qiang Ji "In the Eye of the Beholder: A Survey of Models for Eyes and Gaze". IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 32 (3): 478–500. (2010).
19. Slioussar, N. A., Petrova., T.E., Cherepovskaya, N.V., Prokopenya., V.K., Chernova., D.A., Chernigovskaya., T.V. Eksperimental'nye issledovaniya mental'nogo leksikona: slovosochetaniya s bukv'al'nym i nebu'kv'al'nym znacheniem. Voprosy yazykoznaniya, 3, 83–98 (2018).
20. Rakhilina E. V. Construction Linguistics. Azbukovnik, Moscow (2010).

О простоте: сравнение форматов временной разметки TimeML и tgt-temp*

Светлана Петровна Тимошенко ¹[0000-0002-6700-1644]

¹ Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича

timoshenko@iitp.ru

Аннотация. От аннотированных корпусов текста требуется простота использования. Она зависит от множества факторов, один из которых – простота схемы разметки. В статье сравнивается самый популярный формат разметки TimeML и предлагаемый авторами tgt-temp. Оба они представляют собой расширение формата xml. Главное различие между ними состоит в том, что TimeML – это самостоятельный формат разметки, а tgt-temp – это формат, дополняющий морфологическую разметку текста. TimeML нельзя назвать простым из-за большого числа элементов. tgt-temp предполагает существенно меньшее количество элементов. В статье приводится пример разметки и доказывается, что сокращение элементов разметки по сравнению с TimeML не влечет за собой потери выразительности и различительной способности формата..

Ключевые слова: семантическая разметка, временная разметка, темпоральная разметка, СинТагРус, TimeML, лексикализованные обозначения времени.

1 Вступление

Тезис о том, что вещь, которой пользуется большое количество людей, должна быть простой, кажется очевидным, а критерии простоты - интуитивно понятными. Лингвистический корпус текстов, предназначенный для широкого круга пользователей (лингвистов-исследователей, преподавателей, редакторов, учащихся), должен быть простым. В рамках проекта “Корпус 2.0” большое внимание уделялось простоте поискового интерфейса и простоте формы выдачи результата.

* Работа поддержана грантом № 075-15-2020-793 «Компьютерно-лингвистическая платформа нового поколения для цифровой документации русского языка: инфраструктура, ресурсы, научные исследования».

Однако есть еще один не очевидный аспект, также требующий простоты - это схема разметки - набор используемых помет и способ их записи. Схему разметки часто называют форматом. На примере временной разметки мы продемонстрируем сложный формат и предложим формат более простой.

Временная, или темпоральная, разметка - это выделение в тексте средств выражения информации о времени. Временная информация может выражаться грамматически или лексически. Пример грамматического выражения - видо-временные формы глаголов в русском языке. Примеры лексического выражения - *28 сентября, завтра, через 5 минут, в школьные годы, во время совершения преступления, потом, сразу, с двух часов, четыре часа, несколько лет, трехдневный, долгосрочный, каждый день, по вторникам*.

Самым распространенным и популярным форматом разметки временной информации является TimeML (Time Markup Language). Однако его не раз критиковали за сложность. Мы коротко его опишем, определим, что делает его сложным и предложим альтернативное решение.

2 TimeML

Концепция TimeML впервые была предложена в 2002 году [Pustejovsky et al. 2002]. Последняя на сегодняшний день версия спецификации подготовлена в 2006 году [Sauri et al. 2006]. Наше описание формата основано на ней. Разработка TimeML была мотивирована не столько лингвистическими задачами, сколько запросами компьютерной науки и обработки естественного языка (NLP). В фокусе внимания были следующие вопросы: где во времени расположено данное событие, упоминаемое в тексте? Если событий несколько, то каково их взаимное расположение во времени? Поэтому авторы формата приняли решение ограничить сферу его применения “ясными” случаями. Под ясными случаями понимаются такие текстовые выражения, которые позволяют точно определить положение событий и временных отрезков на временной оси. Эталоном здесь выступают обозначения времени по григорианскому календарю.

Если же рассматривать TimeML под лингвистическим углом зрения, то он представляет собой пример специализированной семантической разметки, так как в разметку эксплицитно включаются события, стоящие за словами, и временные связи между событиями. Это фрагмент смысла текста.

Технически TimeML представляет собой специализированное расширение XML: разметка выполняется с помощью тегов, атрибутов и их свойств. Некоторые теги заключают в себя определенные фрагменты текста. Это классический случай разметки: словам и выражениям приписываются определенные характеристики. Для их записи служат атрибуты тегов. Однако не все теги соотносятся с фрагментами текста - некоторые существуют сами по себе. О них можно думать как о семантических объектах.

2.1 Набор тегов

Теги, выделяющие фрагменты текста, таковы: EVENT (‘события’), TIMEX3 (‘временные выражения’), SIGNAL (‘сигналы’).

В тег SIGNAL заключаются вспомогательные слова временных выражений, главным образом, предлоги.

Все упоминания ситуаций, которые случаются или происходят, заключаются в тег EVENT.

Все релевантные обозначения времени выделяются тегом TIMEX3 (цифра 3 означает преобладание формата относительно TIDES и MUC0). В отличие от тега EVENT, TIMEX3 может и не соотноситься с фрагментом текста. В таком случае это семантический элемент - время, без указания на которое невозможно ответить на вопрос о временной локализации того, что упомянуто в тексте. Например, если в тексте имеется слово завтра, его конкретное, календарное значение определяется относительно момента речи.

Еще один тег, MAKEINSTANCE, никогда не включает в себя текста. Он используется для квантификации событий. Например, в предложении *John taught on Monday and Tuesday* ‘Джон давал уроки в понедельник и во вторник’ единственный глагол *taught* обозначает два акта преподавания. Тег EVENT относится к глаголу *taught*, но порождается также два «экземпляра» (MAKEINSTANCE) события, производных от *taught* и связанных каждый со своим днем недели.

Формат TimeML предусматривает также связи между элементами типа MAKEINSTANCE, TIMEX3 и EVENT. Выделяются связи трех типов: аспектуальная связь, подчинительная связь и временная связь. Для хранения информации о связях используются теги, которые записываются после текста. Каждому типу связи соответствует отдельный тег. ALINK — это аббревиатура от Aspectual Link ‘аспектуальная связь’. Она используется, когда в тексте присутствует указание на фазу события, например, *started to read* ‘начал читать’. SLINK — это аббревиатура от Subordination Link ‘подчинительная связь’, она используется для разметки более или менее грамматических значений, которые в английском языке выражаются отдельным глаголом: модальные значения (*wanted to buy* ‘хотел купить’), эвиденциальные значения (*John said he bought* ‘Джон сказал, что купил’), фактические значения (*managed to leave*, ‘удалось уйти’) и т. д. Наконец, TLINK (Temporal Link ‘временная связь’), отражает временную связь.

2.2 Применение TimeML к разметке корпусов

Исследовательский коллектив, разработавший формат TimeML, также подготовил корпус на английском языке [Pustejovsky et al. 2003] и автоматическое статистическое средство разметки, основанное на данных корпуса. Позднее в соответствии с этим форматом размечались корпуса на других языках и разрабатывались другие автоматические средства разметки – Annotador [Navas-Loro, Rodríguez-Doncel 2020], HeidelTime [Strötgen, Gertz 2015]. Особый интерес представляет HeidelTime, так как этот теггер может размечать тексты на русском языке. В основе алгоритма - подготовленные вручную шаблоны и правила. В распоряжении

программы имеются наборы шаблонов для более чем 200 языков. Подготовка шаблонов для русского языка была выполнена Еленой Леонидовной Клячко в процессе работы над магистерской диссертацией «Автоматическое извлечение временных отношений в текстах на русском языке» (защищена в 2014 г.) С помощью тегера Е. Л. Клячко создала русскоязычный корпус с временной разметкой в формате TimeML. Он доступен для ознакомления и скачивания по ссылке <http://web-corpora.net/wsgi/gisly.wsgi/>

2.3 Пример

Рассмотрим формат TimeML на примере из этого корпуса.

Полный объем данных, полученных с «Кагуи», японцы обещают обнародовать не позднее ноября.

Полный объем данных, полученных с «Кагуи», японцы

```
<EVENT aspect="PROGRESSIVE" tense="NONE" class="REPORTING"
eid="e11">
```

обещают

```
</EVENT>
```

```
<EVENT aspect="PERFECTIVE" tense="NONE" class="OCCURRENCE"
eid="e10">
```

обнародовать

```
</EVENT>
```

не

```
<SIGNAL sid="s8">
```

позднее

```
</SIGNAL>
```

```
<TIMEX3 functionInDocument="NONE" mod="BEFORE" type="DATE"
value="2009-11" tid="t56">
```

ноября

```
</TIMEX3>
```

```
.
<MAKEINSTANCE eventID="e11" eiid="e11"></MAKEINSTANCE>
```

```
<MAKEINSTANCE eventID="e10" eiid="e10"></MAKEINSTANCE>
```

```
<TLINK eventInstanceID="e10" signalID="s8" relatedTo-
Time="t56" relType="IS_INCLUDED"/>
```

В этом предложении два события - EVENT'а, *обещают* и *обнародовать*. Каждому из них соответствует отдельная инстанция - MAKEINSTANCE. Временное выражение одно, *ноября*. Вспомогательную функцию при нем выполняет слово *позднее*.

У каждого из элементов имеется свой идентификационный номер. Помимо этого, элементы типа EVENT имеют три атрибута, aspect, tense и class. Первые два служат для хранения грамматических характеристик, а третий соответствует семантическому классу. Элемент типа SIGNAL никаких атрибутов, кроме идентификатора, не имеет.

Элемент типа TIMEX3 имеет 4 атрибута (за вычетом идентификатора): `functionInDocument`, `mod`, `type`, `value`.

Атрибут `functionInDocument` показывает, является ли данное время текстовой метаинформацией. Множество его допустимых значений таково: 'CREATION_TIME' | 'EXPIRATION_TIME' | 'MODIFICATION_TIME' | 'PUBLICATION_TIME' | 'RELEASE_TIME' | 'RECEPTION_TIME' | 'NONE'.

Атрибут `mod` имеется у обозначений времени, которые считаются «модифицированными»: например, их значение включает в себя действие какого-либо оператора (больше, меньше) или результат членения (начало, конец). В данном случае, значение атрибута 'BEFORE' передает такой смысл: 'время, обозначаемое выражением, предшествует ноябрю'. Строго говоря, этот смысл не вполне соответствует значению русского выражения *не позднее ноября*, однако выразительных возможностей TimeML не хватает, чтобы провести различие между *не позднее ноября* и *до ноября*, о котором см. ниже.

Атрибут `type` указывает тип временного выражения. К типу DATE относятся обозначения календарного времени и содержащие определенные лексические единицы с семантикой временного промежутка, большего, чем час (*Friday* 'пятница', *October 1, 1999* '1 октября 1999 г.', *next week*, 'следующая неделя').

Атрибут `value` хранит формализованное значение темпорального выражения в зависимости от его типа - в данном случае это запись по международному стандарту ISO8601, означающая 'ноябрь 2009 года'.

С помощью элемента TLINK между событием обнаружения и временным выражением устанавливается временная связь типа IS_INCLUDED, т. е. 'включено'. Часть значений, которые может принимать атрибут `relType`, в частности, IS_INCLUDED, заимствована форматом TimeML из модели времени Аллена [Allen, Ferguson 1994]. Эта модель оперирует интервалами на временной оси, описывает их конфигурации и задает набор правил вывода для рассуждений о времени. Отношение включения соответствует случаю, когда один интервал полностью "вложен" в другой, т. е. и начальная, и конечная точки первого находятся внутри второго.

Смущает значение 'NONE' у атрибута `tense` при глаголе *обещают*. Мы предполагаем, что теггер допустил ошибку, которая не была исправлена.

Спецификация TimeML также предполагает, что между *обещают* и *предоставить* имеется подчинительная связь, SLINK.

2.4 Оценка сложности TimeML

Теперь, когда читатель представляет себе структуру разметки, приведем количественные характеристики формата. Как мы уже говорили, используется 7 тегов. В приведенном примере встречаются не все. Атрибутов тоже гораздо больше, чем было рассмотрено.

Тег EVENT, согласно спецификации, имеет два атрибута - идентификатор и атрибут `class`, который хранит информацию о семантическом классе предиката и принимает одно из 7 значений.

Для тега MAKEINSTANCE определены 9 атрибутов: идентификатор, ссылка на соответствующий EVENT, ссылка на релевантный SIGNAL, атрибут для указания на количество и 5 атрибутов для хранения грамматической информации (tense, aspect и т. д. Имеется противоречие между спецификацией TimeML и разметкой корпуса в примере выше, где эти атрибуты относятся к тегу EVENT). Для 4 атрибутов из 9 определены множества приемлемых значений: 4 для атрибута tense, 4 для атрибута aspect, 6 для атрибута pr_morph, 2 для атрибута polarity.

Тег SIGNAL имеет только один атрибут - идентификатор.

Для тега TIMEX3 определены 11 атрибутов: помимо уже упоминавшихся идентификатора, functionInDocument, type, mod и value, имеются следующие атрибуты: beginPoint и endPoint служат для указания на начальную и конечную точки, quant и freq в совокупности передают информацию о периодичности повторов, temporalFunction сообщает, зависит ли значение выражения от других временных выражений (true или false, false означает, что выражение семантически самодостаточно), anchorTimeID хранит ссылку на релевантное время в случае, если выражение семантически не самодостаточно и атрибут temporalFunction принимает значение true. Список допустимых значений для атрибута type включает 4 пункта, для атрибута mod - 12.

Каждый из тегов связей (ALINK, SLINK, TLINK) имеет по 6 атрибутов. Обобщая, можно сказать, что это уникальный идентификатор, ссылка на исходную точку (связь можно мыслить как стрелку), ссылка на конечную точку, тип связи, ссылка на сигнал (см. в примере связь TLINK, соединяющую событие обнаруживать и время t56 и цитирующую в качестве релевантного сигнала s8 (более)). Шестой атрибут имеет технический характер. Хотя атрибуты каждой связи имеют сходные функции, имена атрибутов у каждой связи свои. Самую существенную для связи информацию хранит атрибут с типом связи. Для ALINK зафиксирован набор из 5 типов, для SLINK - из 6, для TLINK - из 14.

Если просуммировать все элементы разметки, то получается 7 тегов, 39 атрибутов, 12 наборов значений, включающих в себя в общей сложности 73 элемента и еще значительный набор конвенций, определяющих запись значения тех атрибутов, для которых нет закрытого списка. Очевидно, что оперировать таким количеством элементов, выполняя разметку вручную, невозможно. Требуется специальный интерфейс с предзаданными полями и возможностью выбора из списка элементов. Но и в случае наличия такого интерфейса задача перед разметчиком стоит нетривиальная, так как выбирать почти все время приходится из большого числа возможностей.

3 tgt-temp

Лингвисты ощущают потребность в более удобном для работы формате временной разметки. Поэтому в лаборатории компьютерной лингвистики ИППИ РАН в 2019 году был разработан формат с рабочим названием tgt-temp.

Его главное отличие от TimeML - он не является независимым форматом разметки, то есть не предназначен для “сырого” текста, не проходившего предобработку и не имеющего никакой другой разметки. По нашему замыслу, временная разметка должна выполняться “поверх” как минимум морфологической разметки, в идеале - поверх морфологической и синтаксической. Поскольку наши исследовательские интересы сосредоточены на современном русском языке, мы ориентировались на формат морфосинтаксической разметки, применяемый в корпусе СинТагРус [Иншакова и др. 2019]. Технически этот формат представляет собой расширение XML, поэтому предлагаемый формат временной разметки также является расширением XML. Это упрощает его с сравнение с TimeML.

3.1 Общая характеристика

Предметом разметки являются лексические средства выражения временной информации - слова и словосочетания: *28 сентября, завтра, через 5 минут, в школьные годы, во время совершения преступления, потом, сразу, с двух часов, четыре часа, несколько лет, трехдневный, долгосрочный, каждый день, по вторникам*. Их предназначение - передавать временную характеристику событий и вещей, поэтому разметка непременно должна отражать семантические связи временных выражений. Этот взгляд определяет структуру предлагаемой разметки - в ней два тега, TEMP и TEMP_RELATION. Тег TEMP хранит характеристики самого выражения, тег TEMP_RELATION - информацию о связи выражения с каким-либо словом.

3.2 Анализ примера

Прежде чем переходить к подробностям, приведем разметку уже использовавшегося иллюстративного предложения.

Полный объем данных, полученных с «Кагуи», японцы обещают обнародовать не позднее ноября.

Как уже говорилось, временная разметка выполняется на основе морфосинтаксической разметки в формате СинТагРус, так что текст уже “упакован” в теги. Предложение целиком заключено в тег S, а каждое слово внутри него - в тег W. Приведем разметку первого слова:

```
<S DATE="30 08 2022 17:37:50" ID="15" STATUS="doubt">
<W DOM="2" EXTRAFEAT="CAP" FEAT="A ЕД МУЖ ВИН НЕОД"
HYPOТ="опред.01" ID="1" KSNAME="ПОЛНЫЙ" ЛЕММА="ПОЛНЫЙ"
LINK="опред">Полный</W>
...
</S>
```

И у предложения, и у слова есть атрибут ID. Это уникальный идентификатор в пределах текста. В данном случае мы имеем дело с пятнадцатым по порядку предложением и первым словом в нем.

В этом предложении выделяется временное выражение *не позднее ноября*. Разметка `tgt-temp` выглядит так:

```

<TEMP HEAD="11" WORDS="10,11,12" ISO8601="XXXX-09-XX">
  <TEMP_RELATION REL="localization" TARGET="15:9"/>
  <TEMP_RELATION REL="interval before" TARGET="15:end"/>
  <TEMP_RELATION REL="end" TARGET="15:12"/>
</TEMP>

```

Тег TEMP вложен в тег предложения S. Атрибут WORDS содержит информацию о границах временного выражения - в виде списка номеров-идентификаторов. Эта запись означает, что временное выражение состоит из десятого, одиннадцатого и двенадцатого слов. Атрибут HEAD играет вспомогательную роль - он хранит информацию о синтаксической вершине временного выражения. Атрибут ISO8601="XXXX-09-XX", подобно атрибуту value формата TimeML, хранит значение выражения в соответствии со стандартом ISO8601 - в тех случаях, когда значение это позволяет, т. е. при обозначении всемирного координированного времени и дат по григорианскому календарю.

Выражение *не позднее ноября* зависит синтаксически и относится по смыслу к глаголу *обнародовать*. Оно позволяет локализовать событие обнародования во времени - ответить на вопрос "когда это произойдет?". Эта связь в разметке представлена с помощью первого тега TEMP_RELATION. Эту запись следует читать так: 'рассматриваемое временное выражение связано с девятым словом в пятнадцатом предложении, выражая относительно него идею локализации во времени'.

Стандартный способ выражения локализации с опорой на имя месяца - это предложная группа, например, *в ноябре*. Рассматриваемое выражение *не позднее ноября* выражает более сложный смысл - 'в интервале времени, концом которого является ноябрь'. Это существенное семантическое приращение, кроме того, оно значимо с точки зрения решения практических задач. Например, дано три текста и требуется выяснить, имеются между ними противоречия или нет. В первом тексте утверждается, что данные будут обнародованы в августе, во втором - что данные будут обнародованы в ноябре, а в третьем - что не позднее ноября. Первый и второй тексты противоречат друг другу, но ни один из них не противоречит третьему. Поэтому сложный смысл выражения *не позднее ноября* хотелось бы сделать эксплицитным и доступным для последующего анализа.

Применим к рассматриваемому временному выражению (*обнародовать*) *не позднее ноября* лексикографический подход (мы руководствуемся методологией, изложенной в [Апресян 1995]). В качестве объекта толкования возьмем так называемую сентенционную форму, включающую в себя ядро толкуемого выражения и необходимые переменные (актанты): *P не позднее X*. Сформулированный выше смысл - это фрагмент толкования для этой формы. Полное толкование может выглядеть так:

P не позднее X-a = 'ситуация P имеет место в интервале времени, концом которого является время X'

На первый взгляд оно кажется правильным, но на самом деле оно не достаточно полное. Оно не показывает, в чем отличие выражения *не позднее* от предлога *до* во временном значении. Ср. *обнародовать до ноября*.

P до X-a = 'ситуация P имеет место в интервале времени, концом которого является время X'

Разница между *P не позднее X-a* и *P до X-a* состоит в положении X-a. В первом случае X включен в описываемый интервал, а во втором о его положении ничего не известно. Эта семантическая неопределенность объясняет, почему конструкция *P до X-a* часто модифицируется наречием *включительно* - оно необходимо, чтобы избежать двусмысленности.

Таким образом, толкование 'ситуация P имеет место в интервале времени, концом которого является время X' соответствует сентенциальной форме *P до X-a*, а толкование *P не позднее X-a* должно быть уточнено:

P не позднее X-a = 'ситуация P имеет место в интервале времени, концом которого является конец времени X'

По этому толкованию видно, что отмечая во временной разметке связь между временным выражением и глаголом *обнародовать* и указывая ее тип, мы, по сути, помечаем семантический актанта. Другими словами, запись `<TEMP_RELATION REL="localization" TARGET />` соответствует фрагменту толкования 'TARGET имеет место в'. Однако в рассматриваемых толкованиях есть и еще один актанта, X. Следовательно, семантически корректная временная разметка должна отмечать и его. Кроме того, она должна отражать различие между *не позднее* и *до*.

По аналогии с актантами P, указание на актанта X мы предлагаем записывать с помощью тега `TEMP_RELATION` и его атрибутов `REL` и `TARGET`. Значение атрибута `REL` в данном случае - 'интервал времени, конец которого'. Это значение кодируется нами как `interval before`. Таким образом временная разметка предложения *Полный объем данных японцы обещают обнародовать до ноября* будет выглядеть так:

```
<TEMP HEAD="7" WORDS="7,8" ISO8601="XXXX-09-XX">
  <TEMP_RELATION REL="localization" TARGET="15:6"/>
  <TEMP_RELATION REL="interval before" TARGET="15:7"/>
</TEMP>
```

Экономя средства разметки, мы предлагаем различие между *не позднее* и *до* также оформлять с помощью тега `TEMP_RELATION`. С его помощью мы кодируем смысл 'конец X-a'. Атрибут `REL` принимает новое значение - 'end'. Однако его нужно правильным образом связать с записью `<TEMP_RELATION REL="interval before" />`, которая означает 'интервал времени, конец которого'. Для этого мы разрешаем атрибуту `TARGET` ссылаться не только на слова (с помощью комбинации из номера предложения и номера слова), но и на другие элементы типа `TEMP_RELATION` в пределах одного временного выражения. Таким образом получаем запись:

Обнародовать не позднее ноября

```
<TEMP HEAD="11" WORDS="10,11,12" ISO8601="XXXX-09-XX"> //вы-
ражение
<TEMP_RELATION REL="localization" TARGET="15:9"/> //локали-
зует событие обнародовать в
```

```
<TEMP_RELATION REL="interval before" TARGET="15:end"/> //ин-  
тервале времени, конец которого - это  
<TEMP_RELATION REL="end" TARGET="15:12"/> //конец ноября  
</TEMP>
```

3.3 Полный перечень элементов `tgt-temp`

Продемонстрировав на примере возможности `tgt-temp`, приведем теперь его количественные характеристики.

У тега `TEMP` - 7 атрибутов, из которых обязательных 2, `HEAD` и `WORDS`. К необязательным, помимо уже упоминавшегося `ISO8601`, относятся `INDEFINITE`, `SUBJECTIVE`, `COMPOSED` и `ANCHOR`. `INDEFINITE` отмечает неопределенность некоторого семантического компонента. Он приписывается выражениям типа *когда-то*. `SUBJECTIVE` отмечает выражения, в значение которых входит субъективная длительность - *долго, недолго* и подобные. `COMPOSED` - вспомогательный атрибут: он отмечает сложно устроенные выражения типа *5-7 января*, которые в силу синтаксических особенностей трудно размечать как два независимых выражения. `ANCHOR` отмечает выражения, эксплицитно задающие дейктический центр, например, дату написания в тексте письма. Каждый из 4 атрибутов принимает одно из двух значений.

У тега `TEMP_RELATION` всего два атрибута, `REL` и `TARGET`. Оба обязательны. Из анализа примера очевидно, что самый семантически нагруженный элемент разметки - это значение атрибута `REL`.

В 2020-2021 мы осуществили пилотный проект создания корпуса с временной разметкой. Временную аннотацию получили несколько десятков текстов, входящих в состав `СинТагРуса`. Проанализировав результаты пилотной серии, мы внесли ряд усовершенствований в формат, в частности, сократили набор значений, которые может принимать атрибут `REL` тега `TEMP_RELATION`, до 20 элементов. Опыт пилотной разметки показывает, что этот набор позволяет отразить на языке разметки все релевантные для русского языка семантические различия между временными выражениями.

Таким образом, наш формат разметки уже по одному количеству используемых элементов гораздо проще `TimeML` и как минимум не уступает ему в выразительности.

4 Заключение

Мы сравнили два формата разметки временной информации в тексте, `TimeML` и `tgt-temp`. `TimeML` известен своей сложностью. `Tgt-temp` задумывался как более простой формат. Оба они являются расширениями `XML`, что упрощает задачу их сравнения.

Простота `tgt-temp` достигается за счет сокращения количества элементов, использующихся в разметке. Сокращены, во-первых, элементы, предназначенные для записи грамматических и синтаксических характеристик: предполагается,

что разметка `tgt-temp` применяется к тексту, уже снабженному морфологической или даже морфосинтаксической аннотацией, содержащей всю релевантную грамматическую информацию. Во-вторых, сокращены атрибуты, не имеющие лингвистического смысла. В-третьих, аккуратно подобран набор семантических значений, используемых для классификации связей временного выражения с другими словами.

Разбираемый в статье пример показывает, что `tgt-temp`, обладая меньшим количеством элементов, позволяет провести больше семантических различий, чем `TimeML`. Кроме того, наша экспериментальная разметка позволяет утверждать, что принятые в `tgt-temp` правила и конвенции записи `TEMP_RELATION` с имеющимся набором значений позволяют сделать так, чтобы разметка в схематическом виде отражала толкование соответствующих временных выражений. Это делает ее семантической в полном смысле слова.

Мы предполагаем также, что корпусные данные в формате `tgt-temp` позволяют делать содержательные обобщения, во-первых, при изучении семантики предложений и, во-вторых, при исследовании поведения видо-временных форм глагола. Справедливость этого предположения нуждается в проверке.

Библиография

- [Allen, Ferguson 1994] - Allen, J. F., Ferguson, G.: Actions and events in interval temporal logic. *Journal of logic and computation*, 4(5), 531-579 (1994).
- [Navas-Loro, Rodríguez-Doncel 2020] - Navas-Loro, M., Rodríguez-Doncel, V.: Annotador: a temporal tagger for Spanish. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 39(2), 1979-1991 (2020).
- [Pustejovsky et al. 2002] Pustejovsky, J., Sauri, R., Setzer, A., Gaizauskas, R. & Ingria, B.: TimeML annotation guidelines. TERQAS Annotation Working Group, 23 (2002).
- [Pustejovsky et al. 2003] Pustejovsky, J., Hanks, P., Sauri, R., See, A., Gaizauskas, R., Setzer, A., Radev, D., Sundheim, B., Day, D., Ferro, L. & Lazo, M.: The timebank corpus. In *Corpus linguistics Vol. 2003*, 647-656 (2003).
- [Sauri et al. 2006] Sauri, R., Littman, J., Knippen, B., Gaizauskas, R., Setzer, A., & Pustejovsky, J.: TimeML Annotation Guidelines Version 1.2. 1. (2006)
- [Strötgen, Gertz 2015] - Strötgen, J., Gertz, M.: A baseline temporal tagger for all languages. In: *Proceedings of the 2015 conference on empirical methods in natural language processing* (pp. 541-547) (2015).
- [Апресян 1995] - Апресян, Ю.: Избранные труды. Том II. Интегральное описание языка и системная лексикография. Школа "Языки русской культуры", М. (1995).
- [Иншакова и др. 2019] - Иншакова, Е. С., Иомдин, Л. Л., Митюшин, Л. Г., Сизов, В. Г., Фролова, Т. И., Цинман Л. Л.: СинТагРус сегодня. В сборнике: *Труды Института русского языка им. В. В. Виноградова* (21), 14-41 (2019). Author, F.: Article title. *Journal* 2(5), 99–110 (2016).

От безусловных оборотов к микросинтаксису¹

А.В.Чара

ИППИ РАН им. А.А.Харкевича, г.Москва

chagachaga@gmail.com

Аннотация. Безусловные обороты – это техническое решение, принятое для сокращения количества единиц в тексте и упрощения лингвистического анализа предложений естественного языка. Поскольку многие из оборотов обладают неконвенциональной семантикой и нетривиальной сочетаемостью, они перерастают в гораздо более самостоятельные единицы, образуя микросинтаксические конструкции. Таким образом микросинтаксис являет собой более принципиальный уровень представления multiword entities, чем безусловные обороты. В работе представлены положительные и отрицательные стороны использования безусловных оборотов, а также область пересечения множеств безусловных оборотов и микросинтаксических единиц. Обсуждаются принципиальные особенности обеих категорий и способы их формального представления. За исключением имён собственных и специальных терминов безусловные обороты системы ЭТАП входят в список микросинтаксических единиц, хотя последних гораздо больше, и подавляющее большинство микроединиц не могут быть отнесены к безусловным оборотам.

Ключевые слова. Микросинтаксис, безусловные обороты, разметка, семантический анализ.

Вводные замечания

В процессе развития NLP многие разработчики пришли к необходимости сокращения количества слов в обрабатываемом тексте, чтобы получать синтаксические, а за ними и семантические структуры более оптимальным путём. Это, в частности, было одним из способов борьбы с комбинаторным взрывом, которым были чреваты многие алгоритмы обработки текста в условиях ограниченности компьютерных ресурсов, таких как память и быстродействие. Было введено понятие «неоднословные единицы» (multiword units), которые рассматривались как единое слово несмотря на наличие в них пробелов. Эти единицы в ряде случаев именовались также «безусловные обороты». Они довольно успешно решали свою задачу по сокращению числа слов в тексте. Сотни таких единиц вводились в компьютерные словари различных систем обработки текста, например, в систему ЭТАП. Такое решение давало значительную экономию при обработке текста, например, выражение ‘во что бы то ни стало’, объединённое в безусловный оборот, сокращало число слов в предложении на целых пять единиц, что заметно сокращало и число рассматриваемых алгоритмом гипотез.

Безусловные обороты

В системе ЭТАП безусловными оборотами называются неоднословные лексические единицы, состоящие из более, чем одного слова, имеющие в своём составе хотя бы один пробел. Порядок компонентов в безусловных оборотах фиксирован. Среди таких оборотов встречаются, в первую очередь:

- 1) составные предлоги (*в качестве, во главе*);
- 2) сложные союзы (*в случае, если, по мере того, как; потому что*);
- 3) наречные выражения (*без устали, где бы то ни было*);
- 4) частицы (*все же, все ж таки*);
- 5) заимствованные составные титулы (*ван ден, фон дер*);
- 6) существительные (*кто бы то ни было, персона нон грата*);
- 7) терминологические сокращения вроде *б/у* ‘бывший в употреблении’, *м/с* ‘метров в секунду’, *ч/б* ‘чёрно-белый’.

Безусловные обороты имеют применение в задачах, связанных с синтаксической и семантической обработкой текста. В связи с этим в практических целях инвентарь безусловных оборотов может расширяться в конкретных приложениях. Например, введение цельной единицы *красная карточка* или *положение вне игры* оказалось весьма

¹ Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-793 «Компьютерно-лингвистическая платформа нового поколения для цифровой документации русского языка: инфраструктура, ресурсы, научные исследования».

удобным для лингвистического анализа текстов с футбольной тематикой. То же самое касается и часто встречающихся неословных имён (*Ким Ир Сен*), брендов (*Интернет Эксплорер*) или топонимов (*Карловы Вары*), а также именных и глагольных выражений типа *что бы то ни было*, *точка зрения*, *бросаться в глаза*. Возможность рассмотрения этих цепочек слов в виде единого целого существенно упрощает работу с текстом. Отметим при этом, что единицы, представляемые как безусловные обороты в расширительном смысле, не обладают некомпозиционной семантикой или нестандартным синтаксическим поведением, свойственным для составных предлогов, предложно-именных сочетаний, частиц, сложных союзов и т.д.

Безусловные обороты – это техническое решение, которое предполагает для неословной единицы в синтаксической структуре предложения один узел, а в толково-комбинаторном словаре отдельную статью, в которой указывается часть речи единицы, а также другие её характеристики и правила, по которым лингвистический анализатор обрабатывает данное выражение. В частности, такие единицы не обязаны быть неизменяемыми, так что их морфологические свойства приходится специально фиксировать. (В системе ЭТАП это делается достаточно громоздким способом в морфологическом словаре: в обороте *что бы то ни было* или *точка зрения* изменяется первый элемент, в обороте *Ким Ир Сен* – последний элемент, а в обороте *красная карточка* – оба элемента.) Это неудобство, однако, с лихвой компенсируется на синтаксическом и семантическом уровнях обработки текста.

На рис. 1 представлена статья толково-комбинаторного словаря для безусловного оборота *при условии, что*. Это подчинительный союз, располагающийся в препозиции или постпозиции к глаголу-хозяйну и имеющий в своём составе запятую, управляющий зависимыми элементами по подчинительно-союзному отношению и зависящий от глагола по обстоятельственной связи. Управляющие свойства фиксируются ссылками на соответствующие правила в словарной статье.

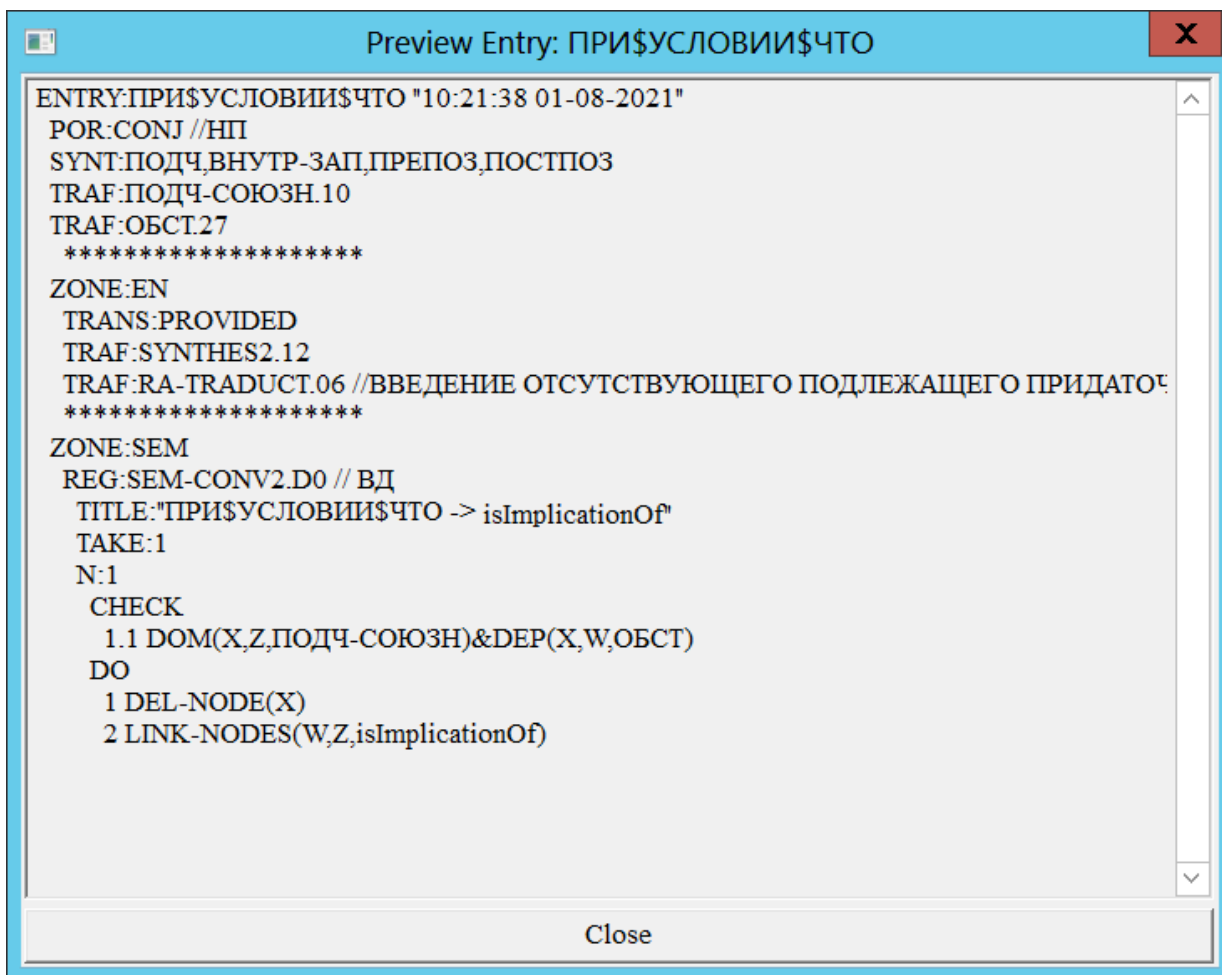


Рис. 1. Статья безусловного оборота в толково-комбинаторном словаре.

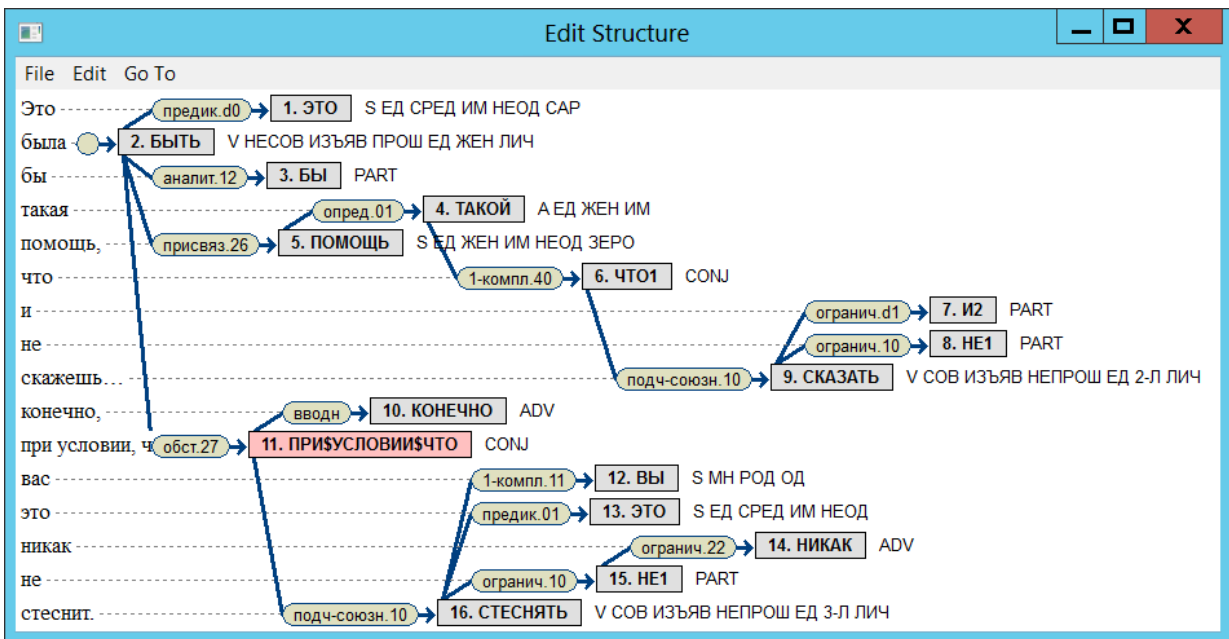


Рис. 2. Синтаксическая структура предложения с безусловным оборотом.

Со временем выяснилось, что, помимо уже отмеченных плюсов, широкое использование безусловных оборотов содержит и значительные издержки. Во-первых, многие обороты омонимичны цепочкам отдельных слов: *к примеру vs. нет претензий к примеру, то есть vs. если болит зуб, то есть трудно* и т.д. Во-вторых, среди оборотов преобладают такие, которые в некоторых случаях могут перемежаться другими словами и выражениями: *несмотря даже на; во что бы то, черт побери, ни стало*. В рамках понимания безусловного оборота как единого и неделимого целого такие явления побороть было нельзя. Таким образом постепенно выкристаллизовалось более широкое понимание неоднословных единиц – микросинтаксические единицы.

Единицы микросинтаксиса

В текущем списке безусловных оборотов, идентифицированных ЭТАПом, примерно 62% составляют микросинтаксические единицы. Фактически, все безусловные обороты, за исключением имён собственных и утилитарно введенных словосочетаний — это конструкции микросинтаксиса. Во многом они близки к фразеологизмам и имеют ряд общих с ними черт: неоднословность, цельность, семантическая некомпозициональность, высокая степень устойчивости, нерегулярность (выход за рамки общих грамматических правил), реинтерпретация грамматических характеристик (компонент выражения, или несколько таковых, меняют свой категориальный статус, как например, *лишь бы* – союз, в то время как по отдельности *лишь* и *бы* – частицы).

Не существует чёткого разделения между идиомами разных типов и единицами микросинтаксиса. Многие из перечисленных выше конструкций в равной степени относятся и к области классической фразеологии, и к микросинтаксису. Главным критерием для разграничения является нестандартное синтаксическое поведение единицы и множество нерегулярных способов выражения грамматических значений внутри неё.

Микросинтаксические конструкции занимают значительное место в русском языке. Эта область состоит не менее чем из нескольких тысяч разнородных единиц, каждая из которых имеет своё уникальное строение, свой неповторимый облик и набор параметров, которые отражают разные смыслы или обуславливают весьма неожиданные синтаксические свойства лексической единицы (Июмдин 2017, Чага 2021). Будучи периферийной частью грамматики, и в первую очередь, синтаксиса, данное языковое явление занимает хоть и меньшую, но отнюдь не малую часть языка. На данный момент словарь выделенных конструкций состоит из примерно 2800 элементов, но можно с уверенностью сказать, что это далеко не исчерпывающий список того, что существует в русском языке.

Идентификация и лингвистическое описание единиц микросинтаксиса связаны со значительными трудностями. На текущий момент не существует надёжного способа их автоматической детекции. Создание полного перечня и тем более описания всех возможных микросинтаксических конструкций невозможно ввиду ряда причин: конструкций в языке тысячи, многие из них имеют более или менее свободное лексическое наполнение, каждая

единица имеет своё уникальное устройство и синтаксически неповторима. Более того, имея набор заданных показателей, не всегда легко даже вручную определить границу между свободным словосочетанием или иной регулярной конструкцией и единицей микросинтаксиса, поскольку встречаются случаи, когда выражения, по внешним признакам удовлетворяющие описанию конструкции, к ним не относятся.

Необходимо создание инструментов, позволяющих отделять случайное соположение элементов от действительных случаев употребления этих элементов в качестве единицы микросинтаксиса. Сложности также представляет то, что многие единицы разрывны, и порой одна входит в состав другой.

На данный момент микросинтаксические единицы размечаются вручную или на основании правил, записываемых в формализме системы ЭТАП. Автоматически собирать список единиц пока не удаётся, и эта задача ожидает своего решения. Корпус текстов с микросинтаксической разметкой, которая в скором времени станет доступна на сайте НКРЯ, предоставляет ценный материал для разработки и проверки работы алгоритмов машинного обучения с целью автоматической детекции единиц, входящих в область микросинтаксиса.

Тот факт, что перечень безусловных оборотов, выделяемых системой ЭТАП, практически на 100%, исключая лишь имена собственные и термины, входит в словарь микросинтаксических конструкций, говорит о том, что это первый серьёзный шаг на пути к их автоматической идентификации и анализу.

В целом, микросинтаксические единицы не могут быть сведены к безусловным оборотам, хотя некоторая их часть имеет с оборотами много общего. Отметим, что и те, и другие могут морфологически изменяться. И всё же большая часть микроединиц не может соответствовать одному слову и далеко не все из них могут занимать один узел в синтаксической структуре. Так, некоторые конструкции микросинтаксиса имеют устройство, характерное для полного предложения:

$V + X\text{-ы и } X\text{-ы} \approx \text{'X-ы бывают разные'}$, где X – название явления, понятия или объекта:

- (1) Он познакомился с ней тоже странно: пожав руку, неожиданно заявил: *«Бывают встречи и встречи»*. [А. С. Грин. Тихие будни (1913)]

X X-у рознь:

- (2) Вообще-то *неприятности неприятностям рознь*. Бывают неприятности разных уровней. [Аркадий Стругацкий, Борис Стругацкий. За миллиард лет до конца света (1974)]

X X-ом, а/но Y Y-ом \approx 'есть X, а есть Y, и они не зависят друг от друга':

- (3) И хотя мы жили с бабушкой под одной крышей, жили одной семьёй, но *крыша — крышей, семья — семьёй, а дело — делом*. [Анатолий Рыбаков. Тяжелый песок (1975-1977)]

На примере работы лингвистического анализатора, который определяет однословные лексические единицы, можно видеть, как многие из них, обладая неконвенциональной семантикой и нетривиальной сочетаемостью, перерастают в гораздо более самостоятельные единицы, образуя единицы микросинтаксиса. Таким образом, микроединицы – это более принципиальный уровень представления multiword units, чем безусловные обороты.

Однословные лексические единицы, автоматически выделяемые системой ЭТАП, делятся на два типа:

- 1) Неизменяемые и неразрывные конструкции, которые не допускают вставления других элементов внутрь. Такие единицы могут считаться эквивалентными обычным словам и представляются в синтаксической структуре как один узел. Например, предлог *по отношению к*, союз *когда*, частицы *разве что, что ни на есть, нет-нет да и*, наречия *как бы то ни было, крепя сердце, из рук вон плохо, стало быть, в обнимку*.
- 2) Выражения, которые естественно считать состоящими из нескольких слов (например, в тех случаях, когда эти слова могут изменяться или разделяться другими словами), но для которых не строится обычная синтаксическая структура. В этом случае все или некоторые слова в выражении соединяются вспомогательным СинтО. В следующих примерах устанавливается одна вспомогательная связь (от X к Y): и так [Y] далее [X]; как [Y] можно [X] быстрее и т.д.

Несмотря на явные преимущества, касающиеся лингвистического описания, наличие безусловных оборотов порождает ряд проблем. Учитывая, что в среднем от 30 до 40% предложений текста содержат хотя бы одну

микросинтаксическую единицу, а в некоторых предложениях встречается до пяти единиц микросинтаксиса, включая безусловные обороты, то числовые характеристики текста могут серьёзно искажаться, мешая расчётам, связанным, например, с частотностью слов, а также поиску конкретных лексем, входящих в состав неоднословных единиц. Таким образом, встаёт вопрос о том, как сохранить информацию о неоднословности лексической единицы, при этом не мешая поиску и подсчёту её отдельных компонентов.

Подход, разработанный нашей лабораторией, позволяет обнаруживать не только цельные и неразрывные отдельно стоящие обороты, но и те, которые разделены или имеют в своём составе какой-либо необязательный элемент: *всё равно vs. не всё ли ему было равно, в то время, как vs. в то самое время, как*. Значительная часть безусловных оборотов и подавляющая часть микроединиц разрывны. Так, довольно долго не идентифицировались случаи вроде ‘несмотря даже на’, ‘по этому ли, по другому поводу’, ‘в Серёжином же случае’ и т.д.

В настоящее время был принят ряд решений для создания правил, позволяющих сохранять информацию о наличии смыслового единства того или иного выражения при оформлении внутренней синтаксической структуры и добавлении морфологической информации о каждом компоненте.

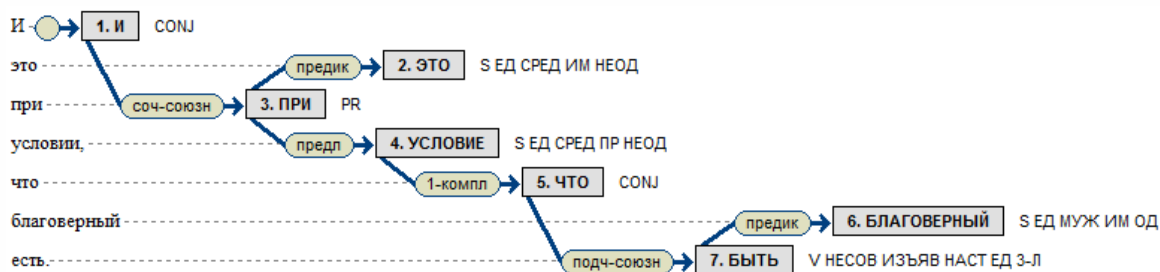


Рис. 3. Полная древесная синтаксическая структура фразы, содержащей неоднословную лексическую единицу ‘при условии, что’.

Благодарность

Выражаю искреннюю благодарность Л. Л. Иомдину за замечания и важные советы при подготовке этой статьи.

Литература

1. Богуславский И.М., Иомдин Л.Л. Безусловные обороты и фраземы в толково-комбинаторном словаре // Актуальные вопросы практической реализации систем автоматического перевода. Ч. 2. М.: Изд-во МГУ, 1982, с. 210–222.
2. Маракасова А.А., Иомдин Л.Л. Микросинтаксическая разметка в корпусе русских текстов СинТагРус // Информационные технологии и системы 2016 (ИТиС’2016). Сборник трудов 40-ой междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН. Репино, Санкт-Петербург. С. 445-449.
3. Иомдин Л.Л. Микросинтаксическая разметка в корпусе русских текстов. // Труды международной научной конференции «Корпусная лингвистика - 2017». Санкт-Петербург, Изд-во СПбГУ, 2017. С. 188-194. ISSN 2412-9623.
4. Иомдин Л. Л. Как нам быть с конструкциями типа как быть? // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной Международной конференции «Диалог» (Москва, 31 мая —3 июня 2017 г.). М.: Изд-во РГГУ, 2017. Вып. 16 (23). Т. 1. С. 161–176.
5. Чага А.В. О русских конструкциях типа не наХ-оваться. // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной Международной конференции «Диалог». Студенческая сессия (Москва, 16 - 19 июня 2021г.).
6. Avgustinova, T., Iomdin, L. Towards a Typology of Microsyntactic Constructions. In: Corpas Pastor, G., Mitkov, R. (eds) Computational and Corpus-Based Phraseology. EUROPHRAS 2019.
7. Leonid Iomdin (2016). Microsyntactic Phenomena as a Computational Linguistics Issue. // Grammar and Lexicon: Interactions and Interfaces. Proceedings of the Workshop. Osaka, Japan. 2016, pp. 8-18. (<http://aclweb.org/anthology/W/W16/W16-38.pdf>). ISBN 978-4-87974-706-8.

Обзор методов оценки сложности текстов в сфере регулирования банковской деятельности

Anton Morkovkin^[0000-0002-2918-6529] and Dmitry Ilvovsky^[0000-0002-5484-372X]

HSE University, Moscow, Russia
amorkovkin@hse.ru
dilvovsky@hse.ru

Abstract. The estimation of textual complexity is an important and relevant task in the field of natural language processing. For example, in the banking sector, according to experts, there is a trend towards increasing the complexity of texts in all areas of financial regulation, which makes them difficult to understand even by professionals. This can lead to different interpretations, so the text should be written in simple language and be understandable to the addressees. However, in order to control the complexity of a text it is necessary to be able to measure it. This article provides an overview of methods for measuring text complexity. We describe both classical approaches based on syntactic features of the text and advanced methods based on the application of universal vector language models.

Keywords: Text complexity, readability index, automatic text processing, banking regulation.

1 Введение

Сложность регулирования может делать его менее эффективным. Применять комплексные правила – когнитивно тяжёлая задача, особенно в случае их описания в виде неструктурированного текста. Поэтому люди начинают заменять их упрощёнными эвристиками. Увеличение лингвистической сложности значительно повышает вероятность неправильной или слишком широкой интерпретации, причём здесь важен компромисс между повышением детальности описания и умолчаниями. Кроме того, сложный корпус нормативных документов часто создаёт регуляторный арбитраж и может тормозить внедрение финансовых инноваций. При этом эксперты отмечают рост объёма регулирования в последние годы, зачастую вместе с ужесточением отдельных критериев. В целом регуляторная нагрузка становится одним из важнейших факторов, определяющих трудоёмкость различных банковских функций и их формальное качество, что, в свою очередь, определяет устойчивость банка.

Развитие интеллектуального анализа данных позволяет перейти на новый уровень в тех задачах оценки и прогнозирования регуляторной нагрузки на банки, которые требуют анализа нормативно-правовых актов и других юридических документов с последующей обработкой извлечённого из текстов знания. Особое

значение приобретает быстрый прогресс в автоматической обработке текста, связанный с появлением универсальных векторных моделей и синтезом статистического машинного обучения, начиная с простейших продукционных правил и заканчивая онтологическим моделированием и управлением знанием.

В данной работе будет сделан обзор методов оценки сложности текстов в сфере регулирования банковской деятельности. Будут рассмотрены как классические подходы на основе синтаксических характеристик текста, так и методы, основанные на применении универсальных векторных языковых моделей.

2 Анализ сложности текста

На трудность восприятия текста могут оказывать влияние следующие лингвистические особенности:

- длина слов и предложений;
- сложность синтаксических конструкций (например, перегруженность причастными и деепричастными оборотами);
- обилие терминов;
- использование неологизмов, жаргонизмов и т.п.

На основе этих особенностей строятся «индексы удобочитаемости» – формулы для оценки сложности читаемости и понимания текстов.

Одним из таких индексов является индекс удобочитаемости Флеша [1]. Он основан на двух метриках: средняя длина предложения в словах (ASL) и средняя длина слова в слогах (ASW). Для английского языка индекс удобочитаемости Флеша выглядит следующим образом:

$$FRE = 206,835 - 1,015 * ASL - 84,6 * ASW \quad (1)$$

В большинстве своем индексы удобочитаемости были разработаны для текстов на английском языке, и не все из них адаптированы для русского языка. Приведем формулу Флеша, скорректированную для русского языка:

$$\begin{aligned} \text{Индекс Флеша} = & 206,835 - 1,3 * \left(\frac{\text{кол-во слов}}{\text{кол-во предложений}} \right) - \\ & - 60,1 * \left(\frac{\text{кол-во слогов}}{\text{кол-во слов}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Результаты, полученные с помощью данной формулы, можно интерпретировать следующим образом:

- 100: Текст очень легко читается;
- 65: Текст написан на простом языке;
- 30: Текст немного трудно читать;
- 0: Текст очень трудно читать.

Индекс Флеша-Кинкейда основан на индексе Флеша и показывает, каким уровнем образования должен обладать читатель исследуемого документа. Данный индекс также основывается на метриках ASL и ASW, но длина предложения взвешивается сильнее, чем в индексе Флеша. В данном индексе заложен тезис, что чем меньше слов в предложениях и чем короче слова, тем проще текст. Формула для расчета индекса для текстов, написанных для русского языка, была адаптирована И.В. Оборновой в 2005 году [2]:

$$\begin{aligned} \text{Индекс Флеша-Кинкейда} = & 0,45 * \left(\frac{\text{кол-во слов}}{\text{кол-во предложений}} \right) - \\ & - 8,38 * \left(\frac{\text{кол-во слогов}}{\text{кол-во слов}} \right) - 15,59 \end{aligned} \quad (3)$$

Для интерпретации оценка уровня образования, полученная по данной формуле, сопоставляется со следующими стандартами:

- 0-10: Школьный уровень;
- 11-15: Уровень высшего образования;
- 15-20: Сложные научные тексты.

Интерпретация следующих рассмотренных индексов будет аналогичной.

Ещё одним методом оценки удобочитаемости текста является индекс туманности Ганнинга (индекс Фога). Он используется в американской журналистике и позволяет определить минимальный возраст читателя, которому будет доступен данный текст. Индекс туманности определяет сложность чтения на основании средней длины предложения и процента сложных слов. Для русского языка сложные слова – это слова, состоящие из четырех и более слогов. Чем больше значение индекса туманности, тем сложнее читать текст. Для текстов, написанных на русском языке, индекс Ганнинга вычисляется по следующей формуле:

$$\text{Индекс Ганнинга} = 0,4 * \left[\begin{aligned} & 0,78 * \left(\frac{\text{количество слов}}{\text{кол-во предложений}} \right) + \\ & + 100 * \left(\frac{\text{количество сложных слов}}{\text{кол-во слов}} \right) \end{aligned} \right] \quad (4)$$

Здесь стоит отметить, что перечисленные выше индексы не всегда позволяют получить корректные оценки сложности текстов и сильно зависят от предметной области. Так Loughran и McDonald [3] выявили главный недостаток формул, считающих слова из нескольких слогов «сложными». Например, в банковской сфере, несмотря на то что слова «financial», «company», «operations», «management», «employee» и т.д. состоят из нескольких слогов, они знакомы и являются «простыми» для большинства людей, работающих с соответствующими текстами, и не должны отрицательно влиять на оценку удобочитаемости.

Для простой и механической оценки сложности текстов был разработан индекс Колман-Лиану [4]. В отличие от теста Флеша-Кинкейда в нем используются не слоги, а буквы и формула расчета учитывает среднее число букв на слово и среднее число слов на предложение. Адаптированная для русского языка формула выглядит следующим образом:

$$\text{Индекс Колман-Лиану} = 0,055 * L - 0,35 * S - 20,33 \quad (5)$$

где L – среднее число букв на 100 слов, S – среднее число предложений на 100 слов.

В 1969 году была разработана формула SMOG [5]. Идея состоит в том, что на сложность текста больше всего влияют сложные слова, которые всегда являются словами со множеством слогов и чем больше слогов, тем сложнее слово. Итоговая формула учитывает число многосложных слов с тремя и более слогами и число предложений. Фактически это оценка пропорции сложных слов к числу предложений:

$$SMOG = \sqrt{\frac{64,6}{\text{кол-во предложений}} * \text{ко-во многосложных слов} + 0,05} \quad (6)$$

Формула Дейла-Чалл была разработана в 1948 году Эдгаром Дейлом и Джоан Чалл [6] на основе списка из 763 слов, 80% которых были знакомы большинству учеников четвертого класса, тем самым определив сложные слова. В 1995 году появилась обновленная формула этого же теста, которая учитывала уже 3000 узнаваемых слов. Для русских текстов формула рассчитывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Дейла-Чалл} = & 0,552 * \left[100 * \left(\frac{\text{кол-во многосложных слов}}{\text{кол-во слов}} \right) \right] + \\ & + 0,273 * \left(\frac{\text{кол-во слов}}{\text{кол-во предложений}} \right) - 15,59 \end{aligned} \quad (7)$$

Автоматический индекс удобочитаемости (ARI) – мера определения сложности восприятия текста читателем, аппроксимирующая сложность текста к номеру класса в американской системе образования, ученикам которого данный текст будет понятен [7]. В отличие от многих других индексов удобочитаемости, ARI основан на количестве букв, а не слогов. Хотя существуют разногласия по поводу точности индексов, основанных на количестве букв в словах, по сравнению с индексами, определяемыми на основе количества слогов, индекс ARI гораздо быстрее и точнее рассчитывать с помощью компьютерных программ. Формула расчета с константами для русского языка выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} ARI = & 6,26 * \left(\frac{\text{кол-во букв}}{\text{кол-во слов}} \right) + \\ & + 0,2805 * \left(\frac{\text{кол-во слов}}{\text{кол-во предложений}} \right) - 31,05 \end{aligned} \quad (8)$$

3 Анализ сложности банковского регулирования

Банковское регулирование является одним из основных инструментов контроля за банковской деятельностью и ориентировано на упорядочение банковской системы, а также на создание оптимальных условий функционирования кредитных организаций. Многие исследователи отмечают, что тексты банковского регулирования становятся сложнее, затрагивая новые понятия, появляющиеся в банковской сфере, а также вводя новые нормы и правила деятельности банковских систем.

Оценка сложности текстов является важной и актуальной задачей области обработки естественного языка, однако специфика исследуемой сферы банковского регулирования вводит дополнительные ограничения на решаемую задачу. Во-первых, не существует четкого определения сложности нормативных актов, во-вторых, при оценке сложности текстов с помощью лингвистических приемов необходимо адаптировать их под исследуемую область.

Сложность регулирования можно определить по-разному: например, как количество фактов, которые принимаются во внимание [8], как количество параметров, которые необходимо оценить банку по требованию регулирования [9], или как результирующую сложность баланса [10].

В работе по исследованию сложности текстов в банковских реформах [11] авторы определяют сложность с точки зрения трудности обработки, возникающей при понимании конкретной языковой единицы, например, одного нормативного положения.

Авторы разделяют сложность на два типа: локальную и глобальную. Локальная сложность показывает непосредственно текстовую сложность данного документа и оценивается в основном стандартными NLP-подходами. Глобальная сложность необходима для определения того, насколько много информации необходимо прочесть в других источниках, чтобы понять смысл данного текста. Для оценки глобальной сложности необходимо использовать сетевой анализ.

В рамках оценки локальной сложности обработки положений к основным характеристикам относятся длина текста, лексическое разнообразие, использование условных предложений и удобочитаемость («локальная» сложность).

Мера длины пытается отразить количество языкового материала, который читатель должен получить, интегрировать и временно хранить до тех пор, пока не будет завершено предложение. Существует множество способов вычислить меру длины (основанные в том числе и на лингвистических структурах, таких как синтаксические деревья). Учитывая, что все меры коррелированы, авторы используют количество слов как быстрый способ аппроксимации этого понятия.

Понимание облегчается, когда слова повторяются. Таким образом, когнитивно простое правило будет иметь много повторений (одно и то же понятие обсуждается снова и снова). Когнитивно сложное правило будет иметь относительно мало повторений. Авторы представляют эту концепцию с помощью меры лексического разнообразия, которая измеряет долю уникальных типов слов в положении.

Условность измеряется путем подсчета количества условных выражений в каждом предложении. Авторы используют следующие слова/фразы для обозначения того, что вводится условное выражение: если, когда (когда-либо), где (когда), если только, несмотря на, за исключением, но, при условии (что).

Для получения общего впечатления о сложности текста авторы используют индекс удобочитаемости Флеша-Кинкейда.

Некоторые трудности обработки могут быть решены только после получения информации вне непосредственного контекста положения – например, перекрестные ссылки или нормативные прецеденты, необходимые для понимания смысла положения («глобальная» сложность). Авторы используют методы обработки естественного языка и сетевого анализа для измерения показателей локальной и глобальной сложности.

При этом в работе приводятся две оценки глобальной сложности, не требующие сетевого анализа и основанные только на словах, используемых в тексте. Так, характеристика расплывчатости оценивает частоту встречаемости расплывчатых терминов, множество которых зафиксировано заранее. К таким терминам относятся, например, «умеренный» и «соответствующий», которые могут стать понятными только благодаря имеющимся прецедентам или общепринятой практике на конкретном рынке. Вторая характеристика оценивает долю точных цифр в положении – в частности, сумм, следующих за индикаторами валюты (£, \$, GBP, USD и т. д.) и процентами (%).

Авторы провели сравнительный анализ сложности текстов за 2007 и 2017 годы. Для этого были рассчитаны показатели локальной сложности для каждого положения. Далее положения в каждом году упорядочили по соответствующему показателю и разбивали на десять децилей. Для каждого дециля было получено среднее значение, на основе которых проводился анализ.

Было обнаружено, что лингвистическая сложность в банковском регулировании сосредоточена в относительно небольшом количестве положений.

Из анализа текстовых показателей локальной сложности было отмечено, что изменения между 2007 и 2017 годами сконцентрированы в верхних децилях, в то время как в нижней, а также в средней части распределений наблюдаются незначительные изменения. Авторы не обнаружили сдвига всего распределения ни по одному из показателей. Этот результат указывает на преемственность в стиле написания положений с течением времени. Авторы статьи предлагают разбивать длинные или содержащие несколько различных концепций положения на несколько различных положений.

Рассмотрим еще одну работу по измерению сложности нормативных актов и текстов по финансовому регулированию [12], в которой предлагается рассматривать тексты как алгоритмы и оценивать их сложность в соответствии с метриками по оценке сложности алгоритмов.

Можно отметить, что в работах в области банковского регулирования прослеживаются две основные тенденции: это либо оценивание непосредственной сложности текста, либо выделение специфических понятий, характерных только для банковской сферы и оценивание сложности исходя из количества и взаимосвязи этих параметров. В работе авторы замечают, что анализ лингвистической

сложности текстов затрагивает только один аспект области банковского регулирования, они называют его психологическим. Авторы выделяют еще два аспекта, без понимания которых невозможно учесть всю специфику исследуемой области, и вводят модель анализа текстов в области банковского регулирования.

Авторы отмечают, что понятие «регуляторной сложности» до сих пор не определено однозначно, длина текста, применяемая в большинстве случаев [13] не отражает всех особенностей нормативных актов. В работе предлагается рассматривать нормативные акты как алгоритмы, и, таким образом, оценивать сложность регуляторных документов по аналогии с оценкой алгоритмической сложности. В данном случае алгоритм, соответствующий определенному нормативному акту, представляет собой конечное множество правил, которые определяют преобразование входных данных (например, банковский баланс) в выходные (нормативное решение). Другими словами, регулирование можно рассматривать как программу, на вход которой подаются финансовые понятия, и которая возвращает требуемые регуляторные действия на выходе. В такой постановке задачи регуляторная сложность ассоциирована с непосредственной сложностью правил или со сложностью алгоритма, соответствующего им.

Сложность алгоритма предлагается оценивать на основании метрик Холстеда [14]. Данные метрики основаны на сопоставлении числа уникальных операторов программы, а также числа уникальных операндов. С точки зрения понимания нормативных актов мы можем рассчитать количество разнообразных правил регулирования (операндов), а также оценить их уникальность, т.е. применяются они к одной экономической сущности или разным.

Считается, что метрики Холстеда позволяют определить как сложность понимания программы, так и трудоемкость ее кодирования, а также уровень языка выражения. Сложность понимания программы отображает т.н. «психологическую сложность». Также авторы указывают, что эта метрика достаточно проста и легко интерпретируема. Простота ее реализации позволяет применить и оценить сложность сразу большого количества разнообразных документов. Помимо разработки программы для оценки регуляторной сложности нормативных актов, авторы определяют оптимальное количество рисков и, следовательно, сложность оптимального регулирования.

Также, кроме непосредственной сложности текста («психологического аспекта») авторы добавляют еще три фактора, которые необходимо оценивать для текстов банковского регулирования. К этим факторам относятся: сложность самой проблемы регулирования, например, проблема направлена на много разных аспектов банковских действий, предсказывает большое количество регуляторных действий и др., сложность регуляторных решений, а также тот факт, что применение регуляции к определенной группе сущностей затратно по времени и ресурсам.

В качестве исследуемых данных авторы рассматривают тексты «Базеля I», первого соглашения Базельского комитета по банковскому надзору в отношении требований к собственному капиталу банков. Авторы заключают, что эта часть правил легко переводится в форму алгоритма. Также данный подход был применен к анализу текстов закона Додда Франка 2010 года и закона о защите прав

потребителей. Авторы отмечают, что несмотря на то, что тексты имеют примерно одинаковую длину, они значительно отличаются по другим показателям, что доказывает универсальность и применимость разработанной модели.

Несмотря на то, что предложенная модель лучше учитывает специфику текстов банковского регулирования, вопрос т.н. «психологической сложности», или сложности понимания текстов, требует глубокого лингвистического анализа. Количество слов в документе является достаточно упрощенной статистической характеристикой текста. Новый уровень понимания текстов может привести к использованию предобученных языковых моделей, которые широко применяют в области обработки естественных языков в настоящее время.

Так в работе [15] авторы исследуют оценку сложности текстов с двух точек зрения, т.н. онлайн и офлайн-парадигмы. В первом случае сложность определяется в соответствии с когнитивными сигналами, полученными от пользователя в процессе чтения текста, это сигналы, полученные непосредственно с головного мозга, или траектория движения глаз пользователя, отслеживаемая специальным прибором. В офлайн-парадигме сложность текста определяется в соответствии с количеством ошибок, которые человек совершает при решении заданий на понимание текста.

Авторы проводят анализ корреляции между сложностью текстов, рассчитанных непосредственно по человеческим оценкам (онлайн или офлайн), а также разнообразными лингвистическими структурными характеристиками текста. Далее проводится анализ нейросетевых моделей и анализируется применимость предобученных эмбедингов текстов для решения задачи анализа сложности текстов. Было показано, что использование как рассчитанных лингвистических характеристик текстов, так и моделей, основанных на глубинном обучении, позволяет добиться сравнимых результатов. В заключение приводится анализ одной из предобученных моделей ALBERT [16] и исследуется, какую информацию, характеризующую сложность текстов, она способна кодировать.

В качестве лингвистических признаков, характеризующих текст, применяется сервис Profiling-UD [17], который проводит аннотацию исследуемых текстов и выделяет около 100 различных лингвистических характеристик для этих текстов. Эти признаки затрагивают как базовые признаки, такие как длина слова или длина предложений, так и более сложные характеристики структуры предложений, например, глубина дерева разбора. Авторы отмечают, что большинство лингвистических признаков, которые показывают высокую корреляцию как с онлайн, так и с офлайн мерами сложности текста, являются идентичными. Наиболее значимыми оказались такие характеристики, как длина текста, глубина дерева разбора и другие показатели, ассоциированные с ними.

Авторы проводят сравнительный анализ моделей, построенных для предсказания онлайн- и офлайн- сложности текстов и показывают, что результаты, полученные обучением стандартных линейных моделей на информативных лингвистических признаках, оказались сравнимы с результатами языковой модели ALBERT, дообученной на наборе, подготовленном для оценки сложности текстов.

Авторы заключают, что последний слой предобученной языковой модели не кодирует информацию, значимую для решения задачи оценки сложности текстов, однако после дообучения модели качество решения задачи значительно возрастает, при этом основные признаки, которые модель способна кодировать – это длина текста и другие характеристики, ассоциированные с ней.

4 Заключение

На основе проведенного анализа существующих подходов к оценке сложности можно сделать следующие выводы. В случае работы с новым корпусом текстов на русском языке наиболее оправданным представляется сценарий, при котором сначала оцениваются базовые показатели «локальной» сложности, основанные на существующих индексах. Помимо стандартных индексов также могут вычисляться различные бизнес-метрики, использующие, например, словари терминов предметной области и т.д. На следующем этапе следует проводить более «продвинутое» исследование, позволяющее понять, насколько сложным является текст с точки зрения использования его в качестве алгоритма действий или источника для автоматического извлечения информации. Здесь уместно применение современных нейросетевых подходов и предобученных моделей представления знаний о языке. Также на данном этапе возможна интеграция нескольких парадигм оценки сложности: «локальной», применяющейся для отдельных текстов, и «глобальной», позволяющей анализировать корпус документов как графовую структуру.

Список литературы

1. Flesch R. A new readability yardstick // *Journal of Applied Psychology*, Vol. 32, No. 3, 1948. pp. 221-233.
2. Оборнева И.В. Автоматизация оценки качества восприятия текста // *Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Информатика и информатизация образования*, Т. 5, 2005. С. 86-91.
3. Loughran T., McDonald B. Measuring readability in financial disclosures // *Journal of Finance*, Vol. 69, No. 4, 2014. pp. 1643-1671.
4. Coleman M., Liao T.L. A computer readability formula designed for machine scoring // *Journal of Applied Psychology*, Vol. 60, No. 2, 1975. pp. 283-284.
5. Mc Laughlin G.H. SMOG grading - a new readability formula // *Journal of reading*, Vol. 12, No. 8, 1969. pp. 639-646.
6. Dale E., Chall J.S. A formula for predicting readability: Instructions // *Educational research bulletin*, Vol. 27, No. 1, 1948. pp. 1-20, 37-54.
7. Smith E.A., Senter R.J. Automated readability index, Wright-Patterson Air Force Base, AMRL-TR 6620, 1967.
8. Kaplow L. Rules versus standards: An economic analysis // *Duke Law Journal*, Vol. 42, 1992. P. 557.

9. Aikman D., Galesic M., Gigerenzer G., Kapadia S., Katsikopoulos K., Kothiyal A., Murphy E., Neumann T. Taking uncertainty seriously: simplicity versus complexity in financial regulation // *Industrial and Corporate Change*, Vol. 30, No. 2, 2021. pp. 317-345.
10. Goldberg L.S., Meehl A. Complexity in large US banks, Federal Reserve Bank of New York, Staff Report 880, 2019.
11. Amadjarif Z., Brookes J., Garbarino N., Patel R., Walczak E. The language of rules: textual complexity in banking reforms., Bank of England, London, Staff Working Paper 834, 2021.
12. Colliard J.E., Georg C.P. Measuring Regulatory Complexity, Centre for Economic Policy Research, London, Discussion Paper 14377, 2020.
13. Haldane A.G., Madouros V. The dog and the frisbee // *Revista de Economía Institucional*, Vol. 14, No. 27, 2012. pp. 13-56.
14. Halstead M.H. *Elements of Software Science (Operating and Programming Systems Series)*. Elsevier , 1977.
15. Sarti G., Brunato D., Dell’Orletta F. That Looks Hard: Characterizing Linguistic Complexity in Humans and Language Models // *Proceedings of the Workshop on Cognitive Modeling and Computational Linguistics*. 2021. pp. 48-60.
16. Lan Z. et al. Albert: A lite bert for self-supervised learning of language representations // *arXiv preprint arXiv:1909.11942*. – 2019.
17. Brunato D., Cimino A., Dell’Orletta F., Montemagni S., Venturi G. Profiling-ud: a Tool for Linguistic Profiling of Texts // *Proceedings of The 12th Language Resources and Evaluation Conference*. 2020. pp. 7145-7151.

О методах сжатия гиперспектральных видеопоследовательностей снятых акустооптическим спектрофотометром

Артём Погадаев^{1,2} и Егор Ершов¹

¹ Институт Проблем Передачи Информации им. А.А. Харкевича РАН,
Москва, Россия

pogadaev.av@phystech.edu,

² Московский Физико-Технический Университет (НИУ)
Долгопрудный, Россия

Аннотация Стремительное развитие методов регистрации и анализа гиперспектральных данных диктует высокие требования к пропускной способности каналов передачи информации и объемам хранилища данных. В качестве ответа на эти требования на протяжении последних 20 лет разработано множество методов сжатия гиперспектральных изображений. В то время работы, посвященные методам сжатия именно гиперспектральных видеопоследовательностей (ГВ) стали появляться только сейчас, что свидетельствует о возникновении нового актуального научного направления. В настоящей работе приведен исчерпывающий обзор и анализ семи существующих на данный момент методов сжатия ГВ. Отдельное внимание в работе уделено методам формирования таких современными акустооптическими спектрофотометрами.

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, гиперспектральные видео, алгоритм сжатия.

1 Введение

В задачах технического зрения важную роль играют объективные, не зависящие от наблюдателя и условий наблюдения характеристики объектов. Основной такой характеристикой является спектр отражательной способности или, что то же самое, спектр окраски. Список применения анализа окрасок включает в себя индексацию баз данных [1], поиск объектов на изображениях и видео, создание высокоточных технологий цветовой репродукции для камер [2], принтеров и других устройств. Массив данных, включающий в себя всю спектральную информацию сцены называется гиперкубом.

Гиперспектральные изображения могут содержать спектр окраски не только в видимом свете, но и в инфракрасном диапазоне. В число только лишь некоторых последних приложений входят дистанционное зондирование [3], исследование атмосферных явлений по спутниковым данным [4], применение в задаче отслеживания [5], идентификация пластика [6], анализ

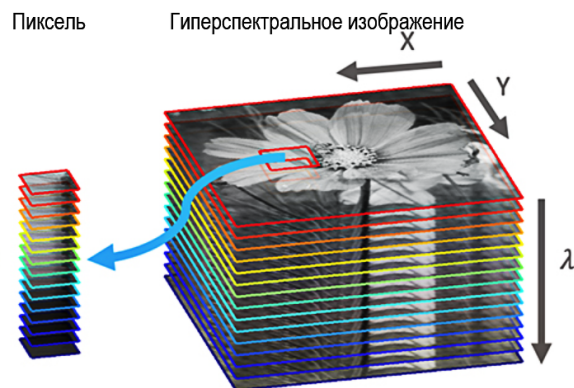


Рис. 1. Пример т.н. гиперкуба. X , Y - пространственные координаты, λ - длина волны.

качества пищевых продуктов [7], диагностика заболеваний растений [8], диагностика кожных осложнений при диабете [9], применения в хирургии [10]. Можно сказать, что в данный момент гиперспектральные данные и задачи, связанные с их обработкой, переживают всплеск популярности.

Помимо изображений, активно развивается область получения и обработки гиперспектральных видеопоследовательностей. Они применяются в медицине, в том числе для обнаружения онкологических заболеваний [11], в агропромышленном секторе [12], в дистанционном зондировании, в детектировании объектов [13].

Однако в терминах скорости и эффективности современных алгоритмов становится очевидной невозможность хранения и обработки всего большого объема получаемых гиперспектральных данных. Для примера, типичный «вес» гиперспектрального изображения колеблется от нескольких десятков, до нескольких сотен мегабайт. Рассмотрим для примера гиперспектральное изображение с линейными размерами 512×512 в каждом пикселе которого хранится 128 чисел, каждое из которых кодируется с использованием 16 Бит. В результате мы получаем объем одного изображения равный 64 Мбайт, а для видеопоследовательности из 128 кадров получим 8Гб. Иными словами для достаточно продолжительной съемки, даже с небольшим количеством кадров в секунду, это терабайты и десятки терабайт.

По этой причине в течение последних лет активное развитие получили методы, связанные со сжатием гиперспектральных данных и их представлением в более оптимальном, с точки зрения размерности, пространстве. Различные методы сжатия характерны для определенного типа задач и приложений. Так, в работе [3] алгоритмы сжатия оцениваются на предмет их пригодности для приложения дистанционного спутникового зондирования. В [14] была разработана классификация подобных методов с учетом

их принадлежности для задач разного типа. Мотивацией авторов послужила полнота обзора методов сжатия гиперспектральных изображений [14] и отсутствие такового для видео.

2 Алгоритмы сжатия гиперспектральных видеопоследовательностей

Вообще говоря, для комплексного анализа проблемы требуется принимать во внимание не только методы сжатия, но и способы формирования гиперспектральных видеопоследовательностей.

Все известные авторам методы сжатия гиперспектральных данных основаны на предположении, что работа ведется с полным гиперкубом – для каждого пикселя доступна вся спектральная информация, а также все данные выровнены – т. е., также доступна вся пространственная информация. Однако в случае реальных данных, а также данных, полученных с помощью акустооптики, это не так. Из-за разной скорости движения сцены пространственная информация может быть потеряна (некоторая часть сцены будет пропущена при съемке). В случае акустооптики, в силу специфичности получения данных (в один момент времени снимается спектральный канал всей сцены), возможна потеря как пространственной, так и спектральной информации для некоторых пикселей в связи с движением сцены. Также, из-за несовершенства алгоритмов компенсации движения ухудшается коэффициент сжатия – из-за изменения корреляции пикселей по всем направлениям.

В данном обзоре, тем не менее, мы сосредотачиваемся на существующих алгоритмах сжатия уже подготовленных в форме последовательности гиперкубов данных.

2.1 Постановка задачи сжатия

Алгоритмы сжатия гиперкубов, ввиду структуры данных, в основном, основаны на извлечении и сжатии с помощью информации о спектральной (зависимости соседних пикселей одного и того же изображения по спектральной компоненте) и пространственной (зависимости между соседними пикселями одного и того же изображения по пространственным координатам) корреляции. При рассмотрении последовательности гиперспектральных изображений возникает новый тип корреляции – временная – зависимость между пикселями разных гиперспектральных изображений. Конечно, практически все алгоритмы, использующиеся для сжатия изображений, подходят и для покадрового сжатия видео, но из-за того, что в таком случае не используется информация о временной корреляции, такой подход не очень эффективен. Shen в [15] провел теоретический анализ потенциального сжатия гиперспектральных данных и показал, что использование временной корреляции увеличивает либо не уменьшает коэффициент сжатия. Все типы межпиксельной корреляции приведены на рисунке 2.

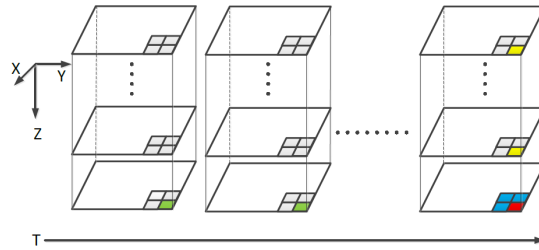


Рис. 2. Все типы межпиксельной корреляции. X и Y – пространственные координаты, Z – спектральная, T – временная. Синие пиксели – пространственная корреляция, зеленые – временная, желтые – спектральная [5].

Часть работ, посвященных сжатию гиперспектральных видео, основаны не только на программной обработке данных, но и также предобработке с помощью модификации либо установке приборов в дополнение к непосредственно снимающему устройству – кодированных щелей [16], кодирующих апертур [17] и т. д. Мы решили рассмотреть алгоритмы, использующиеся для сжатия т.н. «multitemporal» изображений – это спектральные данные одной и той же сцены, полученные в разные промежутки времени. Все подходы, использованные для сжатия таких последовательностей, применимы и к обычным видео – например, с помощью выбора опорного кадра по аналогии с алгоритмами сжатия обычных RGB видео, и дальнейшем сжатием с помощью алгоритмов, предназначенных для «multitemporal» изображений.

2.2 Существующие методы сжатия

Какими свойствами характеризуются алгоритмы сжатия помимо максимального коэффициента сжатия? В нашей работе были использованы следующие: скорость сжатия (онлайн/офлайн), качество сжатия (с потерями/ без) и скорость распаковки (онлайн/офлайн). Все алгоритмы, рассмотренные в работе, приведены в таблице 1.

2.2.1 Метод, основанный на RLS фильтре В статье [18] авторы предлагают подход, основанный на представлении каждого пикселя линейной комбинацией предыдущих пикселей в спектральной и временной компонентах и соседних пикселей в пространственной компоненте. RLS-фильтр, это один из методов обновления весов линейной комбинации, позволяющий добиться минимальной разницы между истинным значением пикселя и значением, полученным в результате вычислений. После вычисления этих разностей, они кодируются с помощью энтропийного кодирования.

Таблица 1. Алгоритмы компрессии

Алгоритм	Скорость сжатия	Качество сжатия	Скорость распаковки	Максимальный коэффициент сжатия
Compression on RLS filter	офлайн	Без потерь	офлайн	4
Compression on LMS filter	офлайн	Без потерь	офлайн	3
MultiTempGan	онлайн	с потерями	онлайн	нет данных
Switched prediction	офлайн	без потерь	офлайн	5
Purmonen	офлайн	с потерями	офлайн	нет данных
Mamun	офлайн	с потерями	онлайн	нет данных
Zhu	офлайн	с потерями	онлайн	8-9

2.2.2 Метод, основанный на LMS фильтре Shen [15] предложил подход, аналогичный предыдущему, но с другим методом обновления весов – фильтром LMS.

2.2.3 Метод MultiTempGan Авторы [19] в своей работе используют генеративно-состязательную сеть. Сжатие происходит за счет того, что необходимы только параметры нейросети.

2.2.4 Метод Switched prediction Возможен и другой подход на основе представления пикселей линейной комбинацией предыдущих значений. Shinde [20] рассматривает три предиктора: на основе пространственной, спектральной и временной корреляции. Предлагается следующая схема: выбирается первоначальный предиктор, далее текущий пиксель представляется линейной комбинацией предыдущих и считается ошибка: разница между вычисленным значением и истинным. Если данная ошибка меньше наперед заданной, то предиктор не меняется. Если больше, то рассчитываются все три линейных комбинации и среди них выбирается лучшая с точки зрения наименьшей ошибки при вычитании из истинного значения.

2.2.5 Метод Purmonen Также в [21] было предложено покадровое сжатие – для спектральных компонент каждого гиперкуба последовательно применялось PCA с последующим преобразованием изображения в «grayscale» (с 8-битным кодированием каждого пикселя), далее для временной области на обработанных изображениях применялся JPEG2000. Стоит отметить, что любой метод сжатия, изначально предназначенный для изображений, переносится на видео – применением алгоритма покадрово.

2.2.6 Метод Mamun В своей работе Mamun [22] также использует временную корреляцию между спектральными полосами для увеличения ко-

эфициента компрессии. Сначала пиксели последовательности изображений обрабатываются с целью уменьшить пространственную и спектральную корреляцию – представляются линейной комбинацией предыдущих пикселей того же изображения. Далее преобразованные пиксели представляются линейной комбинацией соседей во временной компоненте с постоянным коэффициентом, зависящим от выбранного количества соседей по пространственной компоненте.

2.2.7 Метод Zhu Zhu [23] рассмотрел три способа сжатия: на основе линейной регрессии (LR), основанной на предсказании следующего кадра по предыдущим, подход, основанный на конкатенации двух последовательных гиперкубов и последующим применением PCA с выделением компонент следующего изображения (SC подход), и простое покадровое сжатие (IND). В результате тестирования на данных CASSI [24] был сделан вывод об эффективности SC подхода.

3 Заключение

Уменьшение размера изображений и видео является одной из важнейших задач в обработке ГВ. Существует множество методов сжатия изображений, однако количество работ, посвященных компрессии ГВ, очень мало. Методов, посвященных сжатию неполных данных, полученных с помощью акустооптики не существует. В данной работе были рассмотрены все известные авторам на данный момент алгоритмы сжатия гиперспектральных видео. В большей части случаев они были посвящены сжатию т.н. «multitemporal» последовательностей, т. е. изображениям одной и той же сцены спустя некоторые промежутки времени. Однако эти алгоритмы могут быть обобщены и на случай движущихся сцен – временная корреляция в таких случаях все равно имеет место, что можно использовать для более эффективного сжатия, в отличие от подходов, использующих только пространственную и спектральную корреляции.

Список литературы

1. PP Nikolayev, SM Karpenko, and DP Nikolaev. Spectral models of color constancy: selection rules. *Proc ISA RAS*, 38:332–335, 2008.
2. Robert William Gainer Hunt. *The reproduction of colour*. John Wiley & Sons, 2005.
3. AE Oudijk, Fred Sigernes, HCJ Mulders, Sivert Bakken, and Tor Arne Johansen. Quality assessments of standard video compression techniques applied to hyperspectral data cubes. In *2021 11th Workshop on Hyperspectral Imaging and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*, pages 1–5. IEEE, 2021.
4. Nicomino Fiscante, Pia Addabbo, Filippo Biondi, Gaetano Giunta, and Danilo Orlando. Unsupervised sparse unmixing of atmospheric trace gases from

- hyperspectral satellite data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19:1–5, 2022.
5. Lulu Chen, Yongqiang Zhao, Jiaxin Yao, Jiaxin Chen, Ning Li, Jonathan Cheung-Wai Chan, and Seong G Kong. Object tracking in hyperspectral-oriented video with fast spatial-spectral features. *Remote Sensing*, 13(10):1922, 2021.
 6. Cristiane Vidal and Celio Pasquini. A comprehensive and fast microplastics identification based on near-infrared hyperspectral imaging (hsi-nir) and chemometrics. *Environmental Pollution*, 285:117251, 2021.
 7. Gözde Özdoğan, Xiaohui Lin, and Da-Wen Sun. Rapid and noninvasive sensory analyses of food products by hyperspectral imaging: Recent application developments. *Trends in Food Science & Technology*, 111:151–165, 2021.
 8. Canh Nguyen, Vasit Sagan, Matthew Maimaitiyiming, Maitiniyazi Maimaitijiang, Sourav Bhadra, and Misha T Kwasniewski. Early detection of plant viral disease using hyperspectral imaging and deep learning. *Sensors*, 21(3):742, 2021.
 9. Viktor Dremín, Zbignevs Marcinkevics, Evgeny Zherebtsov, Alexey Popov, Andris Grabovskis, Hedviga Kronberga, Kristine Geldnere, Alexander Doronin, Igor Meglinski, and Alexander Bykov. Skin complications of diabetes mellitus revealed by polarized hyperspectral imaging and machine learning. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 40(4):1207–1216, 2021.
 10. Boris Jansen-Winkel, Isabell Germann, Hannes Köhler, Matthias Mehdorn, Marianne Maktabi, Robert Sucher, Manuel Barberio, Claire Chalopin, Michele Diana, Yusef Moulla, et al. Comparison of hyperspectral imaging and fluorescence angiography for the determination of the transection margin in colorectal resections—a comparative study. *International Journal of Colorectal Disease*, 36(2):283–291, 2021.
 11. Martin Hohmann, R Kanawade, F Klämpfl, A Douplik, J Mudter, MF Neurath, and H Albrecht. In-vivo multispectral video endoscopy towards in-vivo hyperspectral video endoscopy. *Journal of biophotonics*, 10(4):553–564, 2017.
 12. David Ehret, Anthony Lau, Shabtai Bittman, Wei Lin, and Tim Shelford. Automated monitoring of greenhouse crops. *Agronomie*, 21(4):403–414, 2001.
 13. Hien Van Nguyen, Amit Banerjee, and Rama Chellappa. Tracking via object reflectance using a hyperspectral video camera. In *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops*, pages 44–51. IEEE, 2010.
 14. Yaman Dua, Vinod Kumar, and Ravi Shankar Singh. Comprehensive review of hyperspectral image compression algorithms. *Optical Engineering*, 59(9):090902, 2020.
 15. Hongda Shen, Zhuocheng Jiang, and W David Pan. Efficient lossless compression of multitemporal hyperspectral image data. *Journal of Imaging*, 4(12):142, 2018.
 16. Guoliang Tang, Zi Wang, Shijie Liu, Chunlai Li, and Jianyu Wang. Real-time hyperspectral video acquisition with coded slits. *Sensors*, 22(3):822, 2022.
 17. Chenning Tao, Huanzheng Zhu, Peng Sun, Rengmao Wu, and Zhenrong Zheng. Hyperspectral image recovery based on fusion of coded aperture snapshot spectral imaging and rgb images by guided filtering. *Optics Communications*, 458:124804, 2020.
 18. Yaman Dua, Ravi Shankar Singh, and Vinod Kumar. Compression of multi-temporal hyperspectral images based on rls filter. *The Visual Computer*, pages 1–11, 2020.
 19. Ali Can Karaca, Ozan Kara, and Mehmet Kemal Güllü. Multitempgan: Multitemporal multispectral image compression framework using generative

- adversarial networks. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 81:103385, 2021.
20. Tushar Shankar Shinde, Anil Kumar Tiwari, and Weiyao Lin. Low-complexity adaptive switched prediction-based lossless compression of time-lapse hyperspectral image data. In *2019 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, pages 1–5. IEEE, 2019.
 21. J Purmonen, M Hauta-Kasari, J Tuomela, H Fukuda, M Mitsui, and M Yamaguchi. Spectral video intraframe compression and database. In *Spectral Imaging: Eighth International Symposium on Multispectral Color Science*, volume 6062, pages 200–207. SPIE, 2006.
 22. Md Al Mamun, Xiuping Jia, and Michael Ryan. Sequential multispectral images compression for efficient lossless data transmission. In *2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing*, volume 2, pages 615–618. IEEE, 2010.
 23. Wei Zhu, Qian Du, and James E Fowler. Multitemporal hyperspectral image compression. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(3):416–420, 2010.
 24. Maria Busuioceanu, David W Messinger, John B Greer, and J Christopher Flake. Evaluation of the cassi-dd hyperspectral compressive sensing imaging system. In *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XIX*, volume 8743, pages 616–629. SPIE, 2013.

Подбор оптимального фильтра для заданного малоканального сенсора в задаче оптической сортировки картофеля

Олег Карасев^{1,2}, Егор Ершов^{1,2}, Лысенко Максим^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
karasev48@mail.ru

Аннотация В работе рассматривается проблема создания автоматической оптической системы компьютерного зрения для решения задачи сортировки картофеля на два класса: «с дефектами», «без дефектов». Подобного рода задачи с высоким качеством могут быть решены с использованием гиперспектральных сенсоров, однако, для реализации экономически эффективного решения они не подходят. В связи с этим, исследуется вопрос возможности адаптации существующих малоканальных сенсоров для решения задачи классификации с сопоставимым уровнем точности. Адаптация сенсора осуществляется путём наложения фильтра заданной спектральной пропускной способности перед объективом камеры для корректировки итоговой спектральной чувствительности. В качестве оптимального критерия для подбора фильтра в работе рассмотрен критерий метода SVM, что позволяет рассматривать задачу в условиях выборок малого размера. Показано, что с использованием двухканальных сенсоров в отсутствии шумов данных на собранном наборе удаётся достичь высоких показателей метрик классификации (accuarcy, F1-score, расстояние от опорных векторов до разделяющей гиперплоскости) с использованием двух каналов (средне- и длинноволнового). Accuarcy, F1-score, абсолютное и относительное расстояние равно 0.94, 0.96, 1.16 и 1.2 соответственно.

Ключевые слова: оптимальный фильтр, задача классификации, SVM, оптическая сортировка, классификация картофеля

1 Введение

За последние три года было написано более 1000 работ, посвященных теме оптической сортировки в различных областях, таких как оптическая сортировка овощей, фруктов, зерна, отходов и так далее. Стоит добавить, что не только научный, но и индустриальный интерес к созданию оптических систем автоматической сортировки существенно возрос и, согласно оценкам, в дальнейшем будет наблюдаться дальнейший стабильный рост [1].

В данной работе рассматривается вопрос оптической сортировки картофеля. Одной из основных задач в данной области является создание не

только высокоточной, но и бюджетной сенсорной системы, что существенно ограничивает возможность использования высокоточных спектральных сенсоров.

В настоящий момент известно несколько способов решения данной проблемы: 1) разработка малоканальных сенсоров с точно заданной характеристикой спектральной чувствительности; 2) совмещение малоканального сенсора с пульсирующими мультиспектральными LED-источниками освещения; 3) разработка специального оптического фильтра для уже существующих камер. В данной работе рассматривается именно третий способ.

Стоит отметить, что аналогичный подход уже применялся в задачах колориметрии. В работе Финлейсона и соавторов [2] решается проблема изменения спектральных характеристик камеры для обеспечения более точного перехода в пространство стандартного наблюдателя XYZ [3]. Для достижения поставленной цели, авторы статьи предложили изменить спектральные характеристики камеры Canon 50D. Авторы статьи предполагают, что процесс нахождения фильтра необходимо должен бы связан с поиском наилучшей цветовой коррекции из RGB в XYZ(1):

$$\min_{D, M} \|DQM - \chi\|, \quad (1)$$

где Q и χ соответственно обозначают матрицу спектральных чувствительностей камеры $N \times 3$ и результат функции цветового сопоставления RGB в XYZ. D – диагональная матрица $N \times N$, фильтр, позволяющий при умножении на него корректировать спектральные чувствительности камер. зеленой и синий спектральных чувствительностей, а M – это матрица цветовой коррекции 3×3 .

В настоящей работе ставится задача поиска оптимального фильтра для малоканального сенсора в задаче классификации картофеля. В отличие от работы [2], в качестве критерия оптимальности рассматривается максимизация расстояния от ближайших к гиперплоскости объектов каждого класса друг от друга (метод SVM) при сохранении качества классификации объектов. На реальных спектрах отражательной способности здоровых и пораженных участков картофеля в работе получена форма оптимального фильтра для разделения на два класса.

2 Критерий поиска оптимального фильтра

Перед исследователями стоит задача математического моделирования оптимального фильтра. Под оптимальностью фильтра понимается *максимальное минимальное расстояние объектов класса до разделяющей гиперплоскости* при сохранении точности классификации (ассигасы и F1-score). Однако, основная проблема данной работы заключается в поиске *неотрицательного фильтра* для сенсора. Таким образом, нами решается задача оптимизации с ограничением на значения фильтра. Помимо этого, авторы статьи обращают внимание читателя на то, что данное исследование решает теоретическую

задачу математического моделирования фильтра для сенсора. В статье не рассматривается инженерная возможность создания подобного фильтра.

Функция потерь SVM [4] (2) состоит из двух частей. Первая часть данной функции потерь называется *hard-margin* и отвечает за расстояние между классами. Функция потерь со второй частью называется *soft-margin* и включает в себя возможность неверной классификации.

$$L = \frac{1}{2} \min_w \|w\|_2^2 + \frac{1}{C} \sum_{i=1} (\max(0, 1 - y_i(w^T x_i + b))) \quad (2)$$

где w – вектор нормали к разделяющей гиперплоскости, x_i – объект данных, y_i – истинный класс объекта, b – смещение, $w^T x_i$ – предсказанный моделью класс объекта и C – коэффициент регуляризации.

В нашей задаче оптимизации авторы статьи обращают внимание только на первую часть функции потерь, так как проблема нашего исследования состоит в поиске оптимального фильтра для максимального разделения классов без мисклассификации. Это достигается благодаря минимизации длины вектора, перпендикулярного к гиперплоскости. Накладывается фильтр на спектральные чувствительности выбранной для исследования камеры. На каждой итерации значений фильтра минимизируется квадрат длины вектора нормали, первой части функции потерь SVM. На значения фильтра накладываем ограничение: фильтр может принимать значения в диапазоне $[0, 1]$. Для оптимизации значений фильтра с указанными ограничениями использовался метод [5].

3 Данные

Для решения задачи, стоящей перед исследователями, был собран датасет картофеля, состоящий из 50 объектов. Датасет содержит 13 снимков качественного картофеля и 37 – бракованного. Данные для исследования собирались с помощью гиперспектральной камеры Specim IQ (рис. 1).

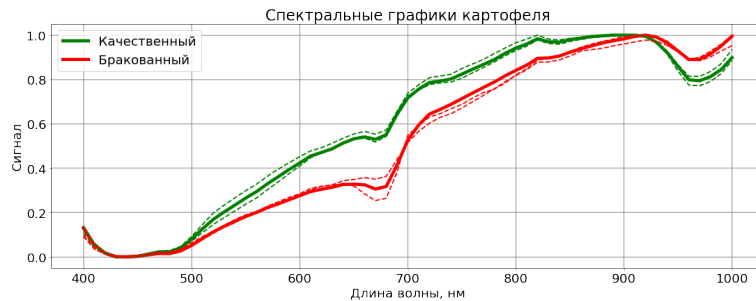


Рис. 1: Спектральные графики картофеля двух классов. Пунктирной линией обозначены первый и третий квартили.

Данные были размечены, объекты усреднены по разметке. Таким образом, был получен датасет для дальнейшей работы. Для поиска фильтра была выбрана трёхканальная камера SONY IMX 249 (рис. 2). Данные спектральных чувствительностей были получены из открытого источника спектральных чувствительностей камер [6]. Так как Specim IQ имеет меньший шаг спектральной чувствительности, нежели SONY IMX 249, данные, полученные при сборе датасета, были линейно интерполированы. В данных присутствует дисбаланс классов, для дальнейшей работы с данными, при разбиении датасета на обучающую и тестовую выборку, данные разделялись с учётом указанной неравномерности.

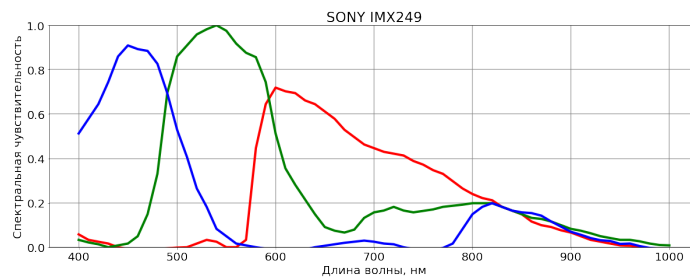


Рис. 2: Спектральная чувствительность камеры SONY IMX249.

4 Эксперимент

Для получения изначального расстояния и точности классификации был использован классификатор SVM. Перед исследователями стоит задача поиска максимального расстояния между классами при сохранении точности классификации. Для этого в модели был увеличен регуляризирующий коэффициент C . Для поиска оптимальных чувствительностей, а так же каналов для классификации картофеля, были обучены SVM модели для каждого возможного варианта для выбранного трёхканального сенсора. Были получены следующие метрики: ассигасу, F1-score, абсолютное расстояние от опорного вектора до разделяющей гиперплоскости и расстояние, относительно максимального разрыва между объектами. Помимо этого, с помощью указанного ранее метода оптимизации были получены скорректированные вектор весов и смещения, посчитаны метрики качества классификации и проведено сравнение между моделями, обучавшимися на данных с применением фильтра и исходных данных.

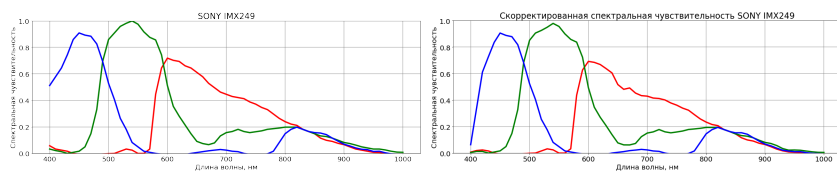
Полученные результаты демонстрируют неизменное качество классификации при наложении фильтра. К сожалению, с помощью линейного фильтра, применяемого к конкретной камере, добиться линейной разделимости классов не удалось. Также стоит отметить, что с помощью фильтра практически на всех вариантах каналности сенсора получилось добиться увеличения расстояния до гиперплоскости, как абсолютного, так и относительного.

Исключение составляют ближневолновый канал и изначальные спектральные данные, полученные с помощью Specim IQ. Помимо этого, авторы статьи обращают внимание на точность классификации в случае использования двухканального сенсора. Сопоставление дальневолнового канала с средневолновым позволяет получить значительную точность классификации, не уступающую по качеству трёхканальному сенсору. Ближневолновый канал содержит мало полезных признаков для классификации объекта на указанные два класса.

Channels	Accuracy	F1-score	Абсолютное расстояние	Относительное расстояние
Red	0.88	0.92	0.0001	0.008
Green	0.76	0.83	0.0004	0.03
Blue	0.47	0.47	0.0007	0.13
Red + Green	0.94	0.96	0.0001	0.018
Red + Blue	0.94	0.96	0.0012	0.10
Green + Blue	0.88	0.92	0.0002	0.026
RGB	0.94	0.96	0.0001	0.014
Specim IQ	1	1	0.0001	0.063

Таблица 1: Результаты классификации на тестовой выборке без наложения фильтра

Получены скорректированные графики спектральной чувствительности с учётом фильтра для трёхканального сенсора (рис. 3b).



(а) Оригинальная спектральная чувствительность камеры SONY IMX249. (б) Скорректированная спектральная чувствительность исследуемой камеры.

Channels	Accuracy	F1-score	Отношение абсолютных расстояний	Отношение относительных расстояний
Red	0.88	0.92	15	13.75
Green	0.76	0.83	1.5	1.6
Blue	0.47	0.47	0.71	0.69
Red + Green	0.94	0.96	10.2	23.3
Red + Blue	0.94	0.96	1.16	1.2
Green + Blue	0.88	0.92	0.65	0.95
RGB	0.94	0.96	10	16.9
Specim IQ	1	1	1	0.98

Таблица 2: Результаты классификации на тестовой выборке с наложением фильтра

5 Заключение

В работе представлен метод получения неотрицательного фильтра для спектральной чувствительности малоканального сенсора. С помощью применения фильтра к исходным данным удалось добиться значимого увеличения расстояния между классами. Однако, переход от гиперспектра к трёхканальному сенсору не позволил сохранить классы линейно разделимыми. Линейный фильтр также не показал эффективности для решения подобной задачи в условиях конкретно взятого сенсора. Получены начальные представления о достаточности двух каналов для разрешения задачи классификации в условиях ограниченного датасета. Получены новые чувствительности камеры, скорректированные с помощью полученного фильтра.

Дальнейшее направление работы авторов будет направлено на расширение датасета и дальнейшую работу по поиску оптимального фильтра и сенсора для улучшения метрик классификации овощей.

Список литературы

1. Market growth. <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/05/09/2438449/0/en/Global-Optical-Sorter-Market-Size-Share-Industry-Trends-Analysis-Report-By-Application-By-Platform-By-Type-By-Regional-Outlook-and-Forecast-2021-2027.html>. Accessed: 2022-08-15.
2. Graham D Finlayson, Yuteng Zhu, and Han Gong. Using a simple colour pre-filter to make cameras more colorimetric. In *Color and Imaging Conference*, volume 2018, pages 182–186. Society for Imaging Science and Technology, 2018.
3. Cie 1931 color space, Aug 2022. Accessed: 2022-08-15.

4. Nello Cristianini and Elisa Ricci. Support vector machines. *Encyclopedia of Algorithms*, page 928–932, 2008.
5. Richard H. Byrd, Mary E. Hribar, and Jorge Nocedal. An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming. *SIAM Journal on Optimization*, 9(4):877–900, September 1999.
6. Stack exchange. <https://photo.stackexchange.com/questions/87172/can-we-compare-the-color-reproduction-accuracy-of-2-camera-sensors-only-by-looki>. Accessed: 2022-08-15.

Метод оценки расстояния Васерштейна с помощью быстрого преобразования Хафа

Алина Шутова^{1,2}, Егор Ершов¹

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия,

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Россия
shutova@iitp.ru

Аннотация В работе предложен метод аппроксимации метрики Васерштейна для случая двумерных дискретных распределений, основанный на усреднении метрики землекопа по всем возможным одномерным проекциям. Использование быстрого преобразования Хафа позволяет получить асимптотическую сложность $O(n^2 \log n)$, где n – линейный размер гистограммы распределения.

Ключевые слова: метрика Васерштейна, метрика землекопа, быстрое преобразование Хафа.

1 Введение

Один из известных способов сравнения двух многомерных распределений основан на использовании расстояния Васерштейна. Достоинством данной метрики можно считать интуитивно понятный смысл – метрика между распределениями α и β измеряет работу по переносу конечных множеств «земли» на минимальные расстояния так, чтобы распределение α трансформировалась в β .

В общем случае p -метрика Васерштейна записывается следующим образом: пусть (M, d) – метрическое пространство, для которого каждая вероятностная мера на M является мерой Радона.

$$W_p(\mu, \gamma) = \left(\inf_{\gamma \in \Gamma(\mu, \gamma)} \int_{M \times M} d(x, y)^p d\gamma(x, y) \right)^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

где $\Gamma(\mu, \gamma)$ обозначает совокупность всех мер по $M \times M$ с маргинальными распределениями μ и γ .

Главным недостатком расстояния Васерштейна являются проблемы с вычислительной сложностью, так как точное вычисление формулы 1 невозможно для размерностей пространства выше 1. По этой причине существует множество аппроксимаций данной метрики, разработанные, по большей части, для восстановления карты оптимального транспорта.

Широко известный алгоритм Синхорна [2] с помощью решения задачи оптимизации позволяет получить приближение расстояния Васерштейна.

Вычислительная сложность данного алгоритма составляет $O(n^2 \log n \tau^{-3})$ для определения расстояния Васерштейна с погрешностью τ [2].

Существует и другой подход к подсчету аппроксимации расстояния Васерштейна [1] с использованием дискретного преобразования Радона, быстрая схема вычисления которого, по всей видимости, строится на быстром преобразовании Фурье.

В данной работе исследуется вопрос достижимой точности вычисления метрики Васерштейна, используя широко распространенный метод анализа изображений – быстрое преобразование Хафа. В разделе 3 описан алгоритм подсчета аппроксимации метрики Васерштейна и показано, что асимптотическая вычислительная сложность предложенного метода составляет $O(n^2 \log n)$. В разделе 4 экспериментально получены оценки точности предложенного метода для различных преобразований гистограмм.

2 Метрика землекопа

Рассмотрим частный случай расстояния Васерштейна, называемый метрикой землекопа: пусть рассматриваемые распределения одномерные и $p = 1$. Метрика землекопа между распределениями α и β для данного случая принимает следующий вид:

$$W_1(\alpha, \beta) = \int_{\mathbb{R}} \int_{-\infty}^x |d(\alpha - \beta)| dx \quad (2)$$

Обозначим за $C_\alpha(x)$ кумулятивную сумму элементов гистограммы распределения α до элемента x . Тогда формулу 2 можно переписать следующим образом:

$$W_1(\alpha, \beta) = \int_{\mathbb{R}} |C_\alpha(x) - C_\beta(x)| dx \quad (3)$$

Отметим, что в дискретном случае для гистограммы размера n трудоемкость вычисления метрики землекопа составляет $O(n)$.

3 Алгоритм подсчета приближения расстояния Васерштейна

Рассматриваемое приближение расстояния Васерштейна для двумерного дискретного распределения строится за счет усреднения метрики землекопа по проекциям на все возможные направления. Здесь и далее считаем, что двумерное дискретное распределение задано в виде изображения размера $n \times n$, отнормированного на сумму всех пикселей.

При последовательном подсчете расстояния землекопа для каждой проекции вычислительная сложность алгоритма будет составлять $O(n^4)$: количество различных проекций – n^2 , проекция изображения на одно направление выполняется за $O(n^2)$, подсчет метрики землекопа, как описано в главе 2, выполняется за $O(n)$.

Для ускорения подсчета проекций будем использовать быстрое преобразование Хафа (БПХ, алгоритм описан в [3]).

Алгоритм подсчета приближения расстояния Васерштейна для изображений α и β описывается следующими шагами:

1. Для корректной работы БПХ необходимо изображение дополнить нулями справа (для преимущественно вертикальных прямых) или снизу (для преимущественно горизонтальных прямых) до размеров $n \times 2n$ и $2n \times n$ соответственно.
2. С помощью БПХ строим 4 Хаф-образа для изображения α : для преимущественно вертикальных прямых, наклоненных вправо и влево, и для преимущественно горизонтальных прямых, наклоненных вправо и влево. Каждый Хаф-образ представляет собой матрицу $n \times 2n$, где n – линейный размер изображения. Объединяем горизонтально Хаф-образы в одну матрицу S_α размером $4n \times 2n$. Подсчет Хаф-образа выполняется за $O(n^2 \log n)$ [3].

Можно заметить, что каждая строка в полученной матрице S_α соответствует сумме вдоль семейства параллельных прямых, а значит, представляет собой проекцию исходного двумерного распределения вдоль прямой, параллельной семейству.

3. Для подсчета метрики землекопа необходимы кумулятивные суммы, поэтому для каждой строки $\{a_{i,j}\}_j$ матрицы S_α подсчитаем кумулятивную сумму ее элементов $\{c_\alpha(i,j)\} = \sum_{k=0}^j a_k$. Матрицу из кумулятивных сумм каждой строки обозначим C_α . Кумулятивная сумма строки считается за $O(n)$, поэтому кумулятивная сумма по каждой из строк выполняется за $O(n^2)$ операций.
4. Аналогично строим матрицу кумулятивных сумм C_β для изображения β , повторив шаги 1 – 3.
5. Необходимо внести поправку в матрицы кумулятивных сумм, вызванную цикличностью прямых в Хаф-образе. Как показано на рисунке 1, пиксели «1» и «2» являются соседними на гистограмме, однако в Хаф-образе суммы по прямым обозначенного на рисунке типа будут под индексами 0 и $n-1$. В статье [4] предлагается алгоритм для подсчета EMD на круге:

$$W_{1,S^1}(\alpha, \beta) = \int_{\mathbb{R}} |C_\alpha(x) - C_\beta(x) - \mu| dx, \quad (4)$$

где μ – медиана элементов $C_\alpha(x) - C_\beta(x)$. Нахождение медианы в массиве можно сделать за $O(n \log n)$. Потребуется найти медиану для каждой поэлементной разности соответствующих строк матриц кумулятивных сумм C_α и C_β , суммарное число операций на этот шаг – $O(n^2 \log n)$

6. Считаем среднее поэлементного модуля разности между соответствующими строками матриц кумулятивных сумм изображений α и β с поправкой на вычисленную ранее медиану разности строк кумулятивных сумм. Выполняется за $O(n)$, по числу строк матриц кумулятивных сумм.
7. Усредненные $4n$ значений будем называть приближением метрики Васерштейна для двумерных распределений α и β .

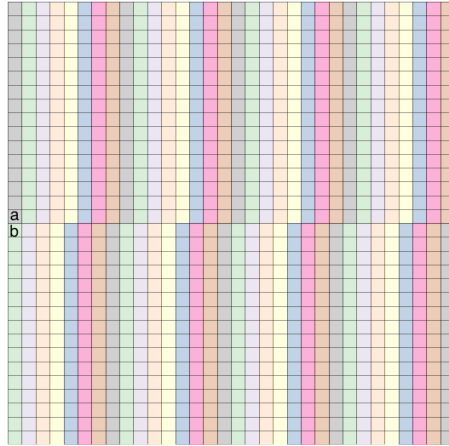


Рис. 1: Визуализация нанесения прямых одной строки Хаф-образа на изображение. Пиксели, обозначенные за «a» и «b» являются соседними для исходного изображения, но в Хаф-образе будут учитываться при суммировании прямых с индексом 0 и n-1. Соседство «a» и «b» будет достигаться только при рассмотрении строки Хаф-образа как кольца

Итоговая вычислительная сложность предложенного метода составляет $O(n^2 \log n) + O(n^2) + O(n^2 \log n) + O(n) = O(n^2 \log n)$ операций.

4 Стендирование приближения метрики Васерштейна

Для стендирования предложенной метрики использовалась часть датасета Cube ++ [5], обозначенная авторами как SimpleCube++. Данный датасет содержит sRGB изображения для сцен вне помещения и внутри, под различными условиями освещения.

Для каждого изображения была вычислена её гистограмма цветности следующим образом:

1. Каждый пиксель изображения переводим в rg-пространство: $r = \frac{R}{R+G+B}$,
 $g = \frac{G}{R+G+B}$
2. По пикселям в rg пространстве строим двумерную гистограмму
3. Нормируем гистограмму на сумму всех пикселей

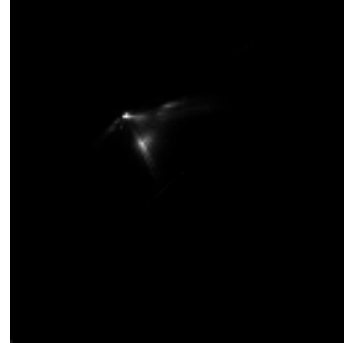
На рисунке 2 показан пример изображения и построенная по нему гистограмма цветности.

Над каждой гистограммой производились следующие элементарные преобразования:

- Параллельный перенос на заданный вектор τ .



(a) Исходное изображение датасета



(b) Гистограмма цветности

Рис. 2: Пример построения гистограммы цветности

- Поворот на заданный угол ϕ относительно верхнего левого угла изображения.
- Скалирование на λ_1, λ_2 вдоль горизонтальной и вертикальной оси соответственно с последующей нормализацией на сумму всех пикселей. При скалировании используется линейная интерполяция.
- Осевая симметрия относительно прямой, параллельной оси Oy и проходящей через центр изображения.
- Осевая симметрия относительно прямой, параллельной оси Ox и проходящей через центр изображения.

Пример исходной гистограммы и гистограмм после преобразований показан на рисунке 3.

Проверялись следующие гипотезы, которые верны для метрики Васерштейна и должны оставаться верны для ее аппроксимации:

1. Для любой пары гистограмм метрика не изменяется при переносе обеих гистограмм на одинаковый вектор τ (вектор должен быть небольшой длины, в пределах 10 пикселей, чтобы вся ненулевая часть гистограммы осталась в пределах изображения).
2. Для любой пары гистограмм метрика не изменяется при повороте обеих гистограмм на одинаковый угол ϕ (угол должен быть в пределах 20 градусов, чтобы вся ненулевая часть гистограммы осталась в пределах изображения).
3. Для любой пары гистограмм метрика увеличится в λ раз при скалировании обеих гистограмм на одинаковый скаляр λ вдоль горизонтальной и вертикальной оси.
4. Для любой пары гистограмм метрика не изменяется при осевой симметрии обеих гистограмм относительно прямой, проходящей через центр изображения и параллельной оси Ox либо Oy .

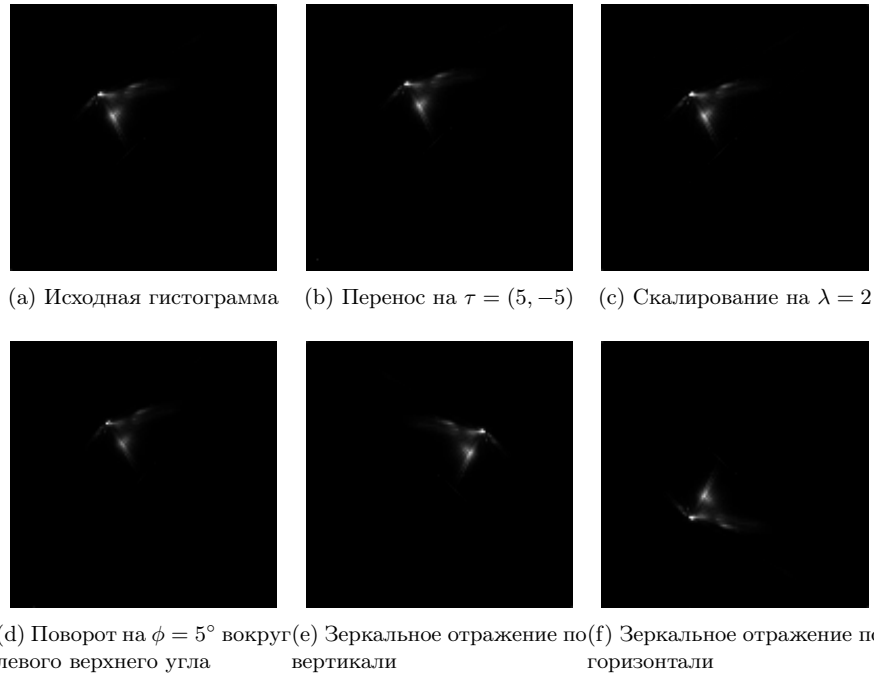


Рис. 3: Пример трансформации гистограммы

Полученные результаты:

Для проверки каждой гипотезы из датасета 10^4 раз случайным образом выбиралась пара гистограмм. Для пары вычислялся модуль разности аппроксимации метрики Васерштейна до преобразований и после преобразований. В случае первой, второй и четвертой гипотезы по подсчитанным модулям разности считалось среднее значение и среднеквадратичное отклонение, в случае третьей гипотезы считалось среднее отношение метрики после преобразования к метрике до преобразования.

1. При переносе обеих гистограмм на одинаковый вектор $\tau = (5, -5)$ средний модуль разности метрик составил 0.1, среднеквадратичное отклонение 0.28. Средний модуль отношения разности метрик к метрике до преобразования составляет 1%.
2. При повороте обеих гистограмм на одинаковый угол $\phi = 5^\circ$ средний модуль разности метрик составил 0.19, среднеквадратичное отклонение 0.52. Средний модуль отношения разности метрик к метрике до преобразования составляет 2%.
3. При скалировании обеих гистограмм на одинаковый скаляр $\lambda = 2$ вдоль горизонтальной и вертикальной оси среднее отношение метрики после преобразования к метрике до преобразования составляет 1,998.
4. При осевой симметрии обеих гистограмм относительно прямой, проходящей через центр изображения и параллельной оси Ox средний модуль разности метрик меньше 10^{-14} .
5. При осевой симметрии обеих гистограмм относительно прямой, проходящей через центр изображения и параллельной оси Oy средний модуль разности метрик меньше 10^{-14} .

Для осевых симметрий и для скалирования гипотезы были выполнены. Для параллельного переноса и поворота результаты согласуются с гипотетическими в пределах погрешности. Самая высокая погрешность у поворота: это связано с неточностью выполнения данного преобразования для изображения малого размера.

5 Заключение

В работе предложен новый метод аппроксимации метрики Васерштейна для двумерных дискретных распределений, основанный на усреднении метрики землекопа по всевозможным проекциям и использовании быстрого преобразования Хафа для ускорения подсчета проекций. Показано, что трудоемкость метода составляет $O(n^2 \log n)$, где n – сторона гистограммы распределения. Описан процесс стандартизации нового метода. Показано, что если изменить две гистограммы одинаковым образом с помощью поворота или параллельного переноса предложенная метрика изменяется в пределах 2%, при скалировании на λ отношение метрики после преобразования к метрике до преобразования равняется λ с погрешностью в 0.1%, а при осевой симметрии разность метрики до преобразования и после преобразования пренебрежимо мала, меньше 10^{-14} .

В продолжение этой работы планируется провести аналогичную процедуру стандартизации для алгоритма Синхорна и сравнить результаты. Помимо этого, планируется провести численные эксперименты на основе следующего наблюдения: известно, как изменяется метрика Васерштейна при параллельном переносе на вектор τ . Если над исходной гистограммой и над гистограммой после параллельного переноса проводить описанные в статье элементарные преобразования, итоговое значение метрики Васерштейна также будет известно.

Список литературы

1. N. Boneel, J. Rabin, G. Peyre, H. Pfister. Sliced and Radon Wasserstein Barycenters of Measures. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, vol.51. pp. 22 – 45 (2015)
2. G. Peyre, M. Cuturi Computational Optimal Transport. *Foundations and Trends in Machine Learning*, vol. 11, no. 5-6 pp. 355 – 607 (2019)
3. E. I. Ershov, A. P. Terekhin, S. M. Karpenko, D. P. Nikolaev, & V. V. Postnikov. Fast 3D Hough Transform Computation. In ECMS. pp. 227 – 230. (2016)
4. J. Rabin, J. Delon, Y. Gousseau Transportation Distances on the Circle. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*. 41. pp. 147 – 167. (2011)
5. E. Ershov, A. Savchik, I. Semenov, N. Bani, A. Belokopytov, D. Senshina, K. Koscevic, M. Subasic, S. Loncaric. The Cube++ Illumination Estimation Dataset. *IEEE Access*, vol. 8. pp. 227511 – 227527. 2020

Исследование коннектомов с помощью вычисления кривизны графов

А.А. Першина, Е.С. Левченко, В.Л. Чернышев

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
aapershina_1@edu.hse.ru

Аннотация В данной работе показаны результаты исследования геометрических характеристик функциональных коннектомов пациентов с болезнью Альцгеймера. С помощью метода k -ближайших соседей мы определили, что кривизна Оливье-Риччи отражает характеристики функциональных коннектомов и может служить биомаркером для решения задачи классификации. В работе приводится описание классификатора, который предсказывает наличие или отсутствие болезни Альцгеймера с точностью 66,9%. Таким образом, было показано, что существует зависимость между свойствами коннектома и геометрическими характеристиками представляющего графа.

Ключевые слова: коннектом, теория графов, дискретная геометрия, кривизна графа, кластеризация

1 Введение

Цель исследования – построение и использование программного решения для исследования функциональных коннектомов с помощью вычисления кривизны соответствующего графа.

Задачи исследования:

- изучение методов вычисления кривизны графа и их программная реализация;
- исследование зависимости между свойствами коннектома и вычисленными характеристиками соответствующего графа.

Актуальность темы обусловлена тем, что в статье [2] был рассмотрен вопрос наличия зависимости между устойчивостью структуры связей головного мозга и заболеваниями аутистического спектра. Было показано, что корреляция между геометрическими характеристиками коннектома и заболеванием действительно присутствует, а измерять устойчивость структуры связей в головном мозге можно через вычисление кривизны Оливье-Риччи.

Другим распространенным и не до конца изученным с точки зрения причин возникновения заболеванием головного мозга является болезнь Альцгеймера. Это заболевание характеризуется потерей нейронов и синаптических связей, и вызываемой гибелью клеток атрофией пораженных участков

мозга [7]. Как следствие, было сделано предположение, что эти процессы повлекут за собой изменение геометрических свойств коннектома, а значит, применение математических методов к соответствующим медицинским данным может дать определенные результаты.

2 Транспортная задача и вычисление кривизны Оливье-Риччи

Расстояние (метрика) Вассерштейна — естественная метрика на пространстве вероятностных мер в метрическом пространстве.

Для рассматриваемой задачи (нахождения кривизны графа) требуется только расстояние W_1 , которое определяется следующим образом:

$$W_1(\mu, \nu) = \inf_{\xi \in \Pi(\mu, \nu)} \int_{X \times X} d(x, y) d\xi(x, y), \quad (1)$$

где $\Pi(\mu, \nu)$ есть множество всех вероятностных мер на $X \times X$, спроецированное на μ и ν .

Другими словами, ξ удовлетворяет условиям:

$$\forall A, B \in X, \xi(A \times X) = \mu(A), \xi(X \times B) = \nu(B). \quad (2)$$

Интуитивно, если каждая вероятностная мера измеряет распределение «грунта» по метрическому пространству M , то расстояние Вассерштейна измеряет минимальную стоимость преобразования одного распределения в другое. Таким образом, вычисление расстояния Вассерштейна сводится к решению так называемой транспортной задачи об оптимальном (с точки зрения минимизации стоимости) плане перевозок.

Тогда для случая графа $G = (V, E)$ в метрическом пространстве (X, d) получаем:

$$W_1(m_x, m_y) = \inf_{\xi} \sum_{x' \sim x} \sum_{y' \sim y} d(x', y') \xi(x', y'), \quad (3)$$

где m_x, m_y — конечные множества, соответствующие вероятностным мерам, а задача сводится к нахождению инфимума для всех матриц ξ , удовлетворяющих соотношениям:

$$\sum_{x' \sim x} \xi(x', y') = \frac{w_{yy'}}{d_y}, \quad \sum_{y' \sim y} \xi(x', y') = \frac{w_{xx'}}{d_x}. \quad (4)$$

Задача нахождения оптимального транспортного плана может быть решена при помощи методов линейного программирования [1], и это позволяет делать библиотека SciPy для языка программирования Python 3. В программном коде эксперимента был использован метод `scipy.optimize.linprog`, который решает задачи линейного программирования методом внутренней точки [11].

3 Вычисление кривизны Оливье-Риччи

Пусть $G = (V, E)$ – связный неориентированный взвешенный граф. Граф (локально) конечен, то есть конечно количество ребер, выходящих из каждой вершины. Степень вершины d_x вычисляется как $\sum_{y \in V} w_{xy}$ (сумма весов инцидентных ей ребер) для каждой из вершин $x \in V$.

Кривизна Оливье-Риччи [4] определяется в метрическом пространстве (X, d) , где каждой точке $x \in X$ соответствует вероятностная мера $m_x, (\cdot)$. Для (локально) конечного графа $G = (V, E)$ определим метрику d на множестве вершин V следующим образом. Для соседних вершин x, y , $d(x, y) = 1$. Для различных вершин x, y , $d(x, y)$ есть длина кратчайшего пути в графе между ними (количество ребер). Каждой вершине присвоим вероятностную меру

$$\begin{cases} \frac{W_{xy}}{d_x}, & \text{если } y \sim x \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

На (X, d) для двух различных точек $x, y \in X$ кривизна Оливье-Риччи по (xy) определяется при помощи формулы

$$\kappa(x, y) = 1 - \frac{W_1(m_x, m_y)}{d(x, y)}$$

Кривизна Оливье-Риччи может определяться не только для отдельного ребра, но и для вершины или даже целого графа [5]. Назовем (скалярной) кривизной вершины x графа G сумму значений кривизны по всем инцидентным ей ребрам графа:

$$\kappa_x = \sum_{y \sim x} \kappa(x, y). \quad (5)$$

Аналогично, «взвешенная» кривизна вершины может быть определена следующим образом:

$$\kappa_x = \sum_{y \sim x} m_x(y) \cdot \kappa(x, y). \quad (6)$$

Соответственно, скалярной/взвешенной кривизной графа G назовем сумму всех значений скалярной/взвешенной кривизны по вершинам этого графа. Все эти свойства были вычислены при помощи языка Python 3 и использовались для исследования графов.

4 Реализация эксперимента

Для исследования использовалась выборка из 151 матрицы смежности графов, из которых 69 соответствуют коннектомат людям с диагностированной болезнью Альцгеймера (значение клинической рейтинговой шкалы деменции (Clinical Dementia Rating, CDR), в которой рейтинг 0.0 соответствует абсолютно здоровым людям, а 3.0 – наиболее сильному заболеванию, больше

0.5), а остальные 82 – коннектомам здоровых людей ($CDR = 0$), из открытого датасета OASIS-3 [6].

Мозговая активность испытуемых была записана во время состояния покоя (resting state) с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ). Предобработка осуществлялась помощью инструмента fMRIPrep [9]. Для парцелляции анатомических структур использовался атлас MSDL [8] с 39 анатомическими областями из пакета Nilearn [10]. Функциональные коннекты создавались с помощью коэффициента корреляции, который измерялся между всевозможными парами временных рядов анатомических областей, это и есть итоговые веса ребер графа из 39 вершин, представляющего коннектом. Далее, для вычисления кривизны графа матрицы либо оставлялись без изменений, либо преобразовывались одним из двух способов – либо округлением до 1 всех ненулевых чисел, либо округлением до 1 чисел, не меньших 0.65, и до 0 – всех остальных (то есть связи, выраженные меньшими коэффициентами, не считались достаточно сильными, чтобы рассматривать их).

Для исследования корреляции между кривизной графа и заболеваниями головного мозга было решено использовать классификацию методом k ближайших соседей, так как было сделано предположение, что графы, представляющие коннектомы здоровых людей, и графы, представляющие коннектомы людей с болезнью Альцгеймера, могут быть похожи между собой, но характеристики графов в разных классах будут отличимы. Для реализации метода k -ближайших соседей и получения оценок по различным метрикам (accuracy, precision, recall) были использованы средства библиотеки Scikit-learn. Для подбора оптимальных вспомогательных параметров (весов и порогового значения threshold вероятности принадлежности классу) в классификаторе был создан класс-«обертка» над библиотечным классом `sklearn.neighbors.KNeighborsClassifier`.

5 Полученные результаты

Методом скользящего контроля leave-one-out были протестированы классификаторы, работающие по алгоритму k -ближайших соседей для нечетных значений k от 3 до 25, и принимающие на вход списки значений кривизны, вычисленных разными способами (по ребрам, по вершинам, по вершинам с весами, а так же все то же самое с параметром бездействия) по обработанным разными способами матрицам смежности (с действительными весами ребер, без весов ребер, только с ребрами, вес которых не меньше 0.65). Расстояния вычислялись по двум разным метрикам. Таким образом, выяснилось, что лучшие результаты показали следующие классификаторы:

- принимающие для каждого графа без весов список значений кривизны Оливье-Риччи по ребрам, считающие расстояния по Евклидовой метрике, число соседей k равно 3 или нечетное от 15 до 23;

- принимающие для каждого графа без весов список значений взвешенной кривизны Оливье-Риччи по вершинам, считающие расстояния по Евклидовой метрике, число соседей k нечетное от 13 до 19.

Для этих классификаторов были дополнительно проверены разные способы подсчета весов, а также пороговые значения (начиная с какой вероятности принадлежности к классу «1» классификатор выдает такой ответ). В итоге наилучшие результаты показали два классификатора:

- модель, использующая кривизну ребер с $k = 17$ и $threshold = 0.52$: $accuracy = 0.642$, $precision = 0.412$, $recall = 0.58$;
- модель, использующая кривизну вершин с $k = 17$ и $threshold = 0.473$: $accuracy = 0.669$, $precision = 0.446$, $recall = 0.652$.

6 Заключение

В рамках данной работы были изучены методы вычисления кривизны Оливье-Риччи для ребер, вершин и всего графа и создана их программная реализация на языке Python 3. Затем было проведено исследование зависимости между свойствами коннектома и вычисленными характеристиками графа, который его представляет. Для этого были испробованы различные способы обработки входных данных (матриц смежности графов), метрики для вычисления расстояния и способы вычисления кривизны Оливье-Риччи, и найден классификатор, который работает с вектором значений кривизны по вершинам графа и на основе метода k -ближайших соседей с $k = 19$ предсказывает наличие или отсутствие болезни Альцгеймера с точностью 66,9%.

Из этого следует, что определенная зависимость между свойствами коннектома и геометрическими характеристиками представляющего его графа присутствует, и есть смысл исследовать ее дальше.

Список литературы

1. Villani, C. Topics in optimal transportation. American Mathematical Society, 2003.
2. Farooq, H., Chen, Y., Tryphon, T.G., Tannenbaum, A., Lenglet, C. Network Curvature as a Hallmark of Brain Structural Connectivity. <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/162875v1>
3. Peyrerimhoff, N. Curvature notions on graphs. Leeds summer school, <https://www.maths.dur.ac.uk/~dma0np/peyerimhoff-lecture-notes.pdf>
4. Ollivier, Y. Ricci curvature of Markov chains on metric spaces. Functional Analysis 256(3), 810–864 (2009)
5. Liu, S., Jost, J.: Ollivier’s Ricci curvature, local clustering, and curvature-dimension inequalities on graphs. Discrete Comput. Geom. 51, no. 2, 300-322 (2014)
6. LaMontagne, P.J., Benzinger T.L.S., Morris J.C.: OASIS-3: Longitudinal Neuroimaging, Clinical, and Cognitive Dataset for Normal Aging and Alzheimer Disease, <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2019.12.13.19014902v1>
7. Wenk, G.L.: Neuropathologic changes in Alzheimer’s disease. The Journal of Clinical Psychiatry. 64 Suppl 9: 7–10. (2003)

8. Varoquaux, G., Gramfort, A., Pedregosa, F., Michel, V., Thirion, B. Multi-subject dictionary learning to segment an atlas of brain spontaneous activity. *Information Processing in Medical Imaging*, Gabor Szekely, Horst Hahn, Jul 2011, Kaufbeuren, Germany. pp.562-573
9. Esteban, O., Markiewicz, C.J., Blair, R.W., Moodie, C.A., Isik, A.I., Erramuzpe, A. et al.: fMRIPrep: a robust preprocessing pipeline for functional MRI. *Nat Meth.* (2018) <https://doi.org/10.1038/s41592-018-0235-4>
10. Abraham, A., Pedregosa, F., Eickenberg, M.: Machine learning for neuroimaging with scikit-learn, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fninf.2014.00014/full>
11. SciPy Reference Guide. Method `linprog(method='interior-point')` description, <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/optimize.linprog-interior-point.html>

Предобучение без учителя для задачи сегментации анатомических структур на КТ-изображениях

Гончаров^{1,2} М. Ю., Кулешов² И. А., Соболева^{1,2,*} В. В., Соболева^{1,2,*} Е. А.,
Беляев¹ М. Г.

¹ Сколковский институт науки и технологий

² Московский физико-технический институт

Mikhail.Goncharov2@skoltech.ru, kuleshov.ia@phystech.edu,
burdina.vv@phystech.edu, soboleva.ea@phystech.edu

Аннотация В данной работе предлагается метод предобучения без учителя нейросети для сегментации анатомических структур на КТ-изображениях. Нейросеть обучается возвращать карту признаков, в которой для каждого вокселя вектор признаков кодирует информацию об анатомическом расположении этого вокселя. На датасете из 50 КТ-изображений показано, что нейросеть, дообученная после предобучения предложенным методом, более качественно решает задачу сегментации 13 органов брюшной полости, чем нейросеть обученная со случайной инициализацией.

Ключевые слова: обучение без учителя, сегментация медицинских изображений, сверточные нейронные сети

1 Введение

При построении алгоритмов анализа изображений компьютерной томографии (КТ) часто возникает задача сегментации органов или анатомических структур. Например, наиболее точные алгоритмы для выявления аневризм аорты используют нейросети для сегментации аорты на КТ грудной клетки или брюшной полости [14], а алгоритмы для оценки степени тяжести пациента с COVID-19 в качестве вспомогательного шага сегментируют лёгкие на КТ грудной клетки [6].

В настоящее время, наиболее точные методы сегментации КТ-изображений основаны на нейросетях [15, 16]. Для обучения нейросети необходимо разметить обучающую выборку, что является долгим и дорогостоящим процессом, потому что 1) ручная разметка сегментационных масок для трёхмерного КТ-изображения занимает много времени, и 2) качественную разметку могут производить только эксперты, т.е. врачи-радиологи.

Одним из подходов к тому, чтобы уменьшить количество размеченных данных, требующихся для обучения качественной нейросети, является предобучение внутренних представлений нейросети на неразмеченных данных,

* Равноценный вклад.

т.е. без учителя (self-supervised learning) [12]. За последние несколько лет были предложены успешные методы предобучения без учителя нейросетей для анализа естественных изображений [4, 7, 10, 21]. Во многих работах эти методы были применены для предобучения нейросетей на медицинских изображениях [2, 18]. Нейросети, предобученные этими методами могут быть дообучены для решения разных задач анализа медицинских изображений: классификации или сегментации анатомических структур или патологий.

Вклад данной работы заключается в том, что мы предлагаем метод предобучения нейросети на неразмеченных КТ-изображениях, который явно учитывает, что внутренние представления предобученной нейросети будут использованы для решения задачи сегментации анатомических структур на КТ-изображении. Мы показываем, что нейросеть, предобученная предложенным методом, после дообучения показывает более высокое качество решения задач сегментации анатомических структур, чем нейросеть, обученная со случайной инициализацией.

2 Обзор литературы

За последние годы было предложено несколько новых подходов к предобучению без учителя для задач компьютерного зрения. В [20] авторы обучали нейросеть возвращать для разных изображений, как можно более далёкие векторные представления, нормированные на единичную многомерную сферу (instance-level discrimination). В [4, 11] используется обобщение этой идеи — контрастивное обучение: нейросеть обучается так, чтобы векторные представления для разных изображений из обучающей выборки (негативные пары изображений) были дальше друг от друга, чем векторные представления для положительных пар изображений. В положительной паре изображения получены из одного и того же изображения применением двух разных трансформаций (поворотов, обрезаний, преобразований цвета). Другие методы предобучения без учителя [10] относятся к классу восстанавливающих автокодировщиков, идея которых заключается в том, чтобы для входного изображения, возможно искаженного некоторым образом (зашумленного, неполного или т.д.), возвращать некоторое внутреннее представление, из которого декодировщик может восстановить исходное, неискаженное изображение. Наконец, в [5, 7] авторы предлагают подход, который наследует идеи и из контрастивного обучения и из автокодировщиков: нейросеть обучается отображать изображение во внутреннее представление, по которому можно восстановить внутреннее представление другого изображения, которое составляет с исходным положительную пару (неконтрастивное обучение).

На медицинских изображениях авторы часто применяют методы предобучения, которые изначально были предложены для естественных изображений и не учитывают специфику медицинских изображений. Так, в [18] авторы предлагают версии двух методов на основе контрастивного обучения и трёх методов по типу автокодировщиков для трёхмерных изображений. Методы, предложенные в [3, 24] также можно отнести к классу восстанавлива-

ющих автокодировщиков. В [8, 9, 17, 23] авторы комбинируют контрастное обучение и восстанавливающие автокодировщики.

В [2] авторы предлагают метод на основе контрастного обучения, который учитывает специфику КТ-изображений. Они предполагают, что в обучающей выборке на всех изображениях одни и те же анатомические зоны имеют примерно одни и те же координаты. Поэтому, для того чтобы обучить разные внутренние представления для разных анатомических зон, при контрастном обучении патчи с одинаковыми координатами из изображений разных пациентов используются в качестве позитивных пар, а патчи с разными координатами в качестве негативных пар. Недостаток этого метода заключается в том, что предположение о том, что в одном и том же месте КТ-изображений всегда расположена одна и та же анатомическая зона, не выполняется для реальных выборок.

В [22] метод незначительно отличается от метода, предложенного в данной работе, но авторы не используют его в качестве предобучения для задач сегментации.

3 Метод

В предложенном методе предобучается сверточная нейросеть f_θ , которая принимает на вход трёхмерное КТ-изображение x произвольного размера (H, W, D) и возвращает карту признаков $f_\theta(x)$ размера (C, H, W, D) , где C — размерность вектора признаков в каждом вокселе.

Цель метода в том, чтобы вектор признаков в каждом вокселе кодировал информацию о том, где анатомически расположен этот воксель. Поэтому от нейросети требуются следующие свойства:

- *Дискриминативность*: векторы признаков для «далёких» вокселей должны быть «далеки». В данной работе мы считаем, что воксели «далеки», если расстояние между ними $> d$ ($d = 5$ вокселей).
- *Эквивариантность* относительно аффинных преобразований и обрезаний входного изображения. Это значит, что $f_\theta(T(x)) = T(f_\theta(x))$, где T — композиция произвольных аффинного преобразования и обрезания. При этом размер обрезанного изображения не должен быть меньше некоторого минимального размера, при котором еще возможно распознать анатомическое положение вокселей.

Эти свойства нейросети достигаются посредством минимизации контрастной функции потерь:

$$-\sum_i \log \frac{\exp(\cos(h_i^{\text{anc}}, h_i^{\text{pos}})/\tau)}{\exp(\cos(h_i^{\text{anc}}, h_i^{\text{pos}})/\tau) + \sum_j \exp(\cos(h_i^{\text{anc}}, h_j^{\text{neg}})/\tau)},$$

где h_i^{anc} и h_i^{pos} — векторы признаков, соответствующие одному и тому же вокселю i исходного изображения, взятые из $T(f_\theta(x))$ и $f_\theta(T(x))$, а h_j^{neg} — вектор признаков, взятый из $f_\theta(x)$ для вокселя j «далёкого» от вокселя i (см.

Рис.1). В данной работе индексы j сэмпляются в количестве $N^{neg} = 32$ случайно и независимо для каждого i на каждой итерации стохастической оптимизации функции потерь.

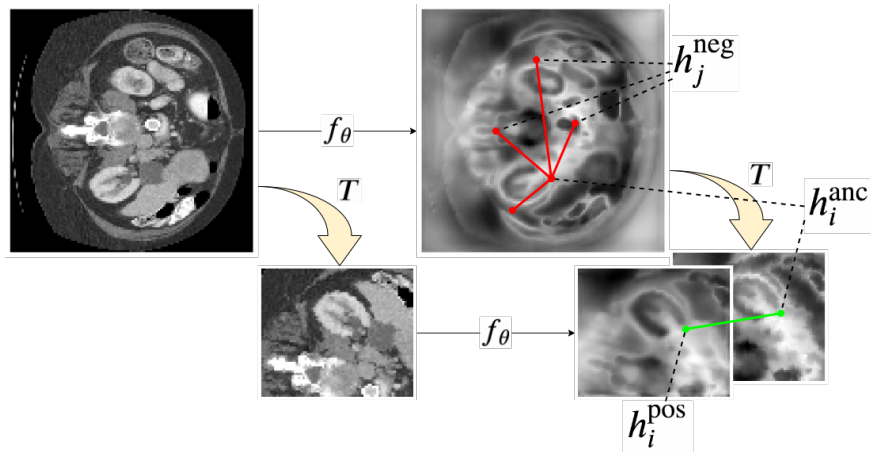


Рис. 1: Иллюстрация предложенного метода предобучения на основе контрастной функции потерь.

4 Эксперименты

Для численной оценки предложенного метода предобучения мы сравниваем качество сегментации для двух нейросетей: 1) обученной со случайной инициализацией весов и 2) дообученной после предобучения (fine-tuning).

Для экспериментов используется датасет FLARE2022 [1], который состоит из 2000 неразмеченных и 50 размеченных КТ-изображений брюшной полости. Разметка включает маски 13 органов брюшной полости. 2000 неразмеченных изображений используются для предобучения. Обучение и тестирование нейросетей для сегментации производится с помощью 5-фолд кросс-валидации на 50 размеченных изображениях.

Предобработка КТ-изображений включает: 1) обрезание по ограничивающему боксу туловища пациента, маска которого получается из изображения по пороговому значению -500HU ; 2) трилинейную интерполяцию изображения к размеру $(128, 128, 128)$; 3) приведение к расширенному мягкотканному радиологическому окну $[-200, 300]\text{HU}$ [19].

Используемая архитектура нейросети — U-Net [16] с небольшими модификациями. При обучении для задачи сегментации выходное число каналов $K = 13$ равно числу сегментируемых классов, финальная функция активации — сигмоида и функция потерь — усредненная по всем классам сумма бинарной кросс-энтропии и Dice-лосса [15] (multilabel segmentation).

Для оптимизации весов нейросетей используется алгоритм Adam [13] с learning rate = 0.0001. Оптимизация останавливается, если значение функции потерь на валидационной выборке не улучшается в течение 100 эпох.

При предобучении, число каналов карты признаков $C = 16$. После предобучения последние два сверточных блока заменяются на случайно инициализированные сверточные блоки. При дообучении, первые 1500 итераций оптимизируются только случайно инициализированные веса, а затем с одинаковым learning rate оптимизируются веса всей нейросети.

Для численной оценки качества сегментации для каждого органа подсчитывается средний по тестовому фолду Dice-коэффициент [15] между ground truth маской и картой вероятностей, предсказанной нейросетью. Дисперсия среднего Dice-коэффициента вычисляется по 5 фолдам кросс-валидации.

5 Результаты

На Рис.2 показаны результаты сравнения двух нейросетей: 1) обученной со случайной инициализацией и 2) дообученной после предобучения предложенным методом. Качество сегментации всех 13 органов предобученной нейросети стабильно выше, чем у нейросети со случайной инициализацией, причем этот эффект усиливается при уменьшении размера обучающей выборки.

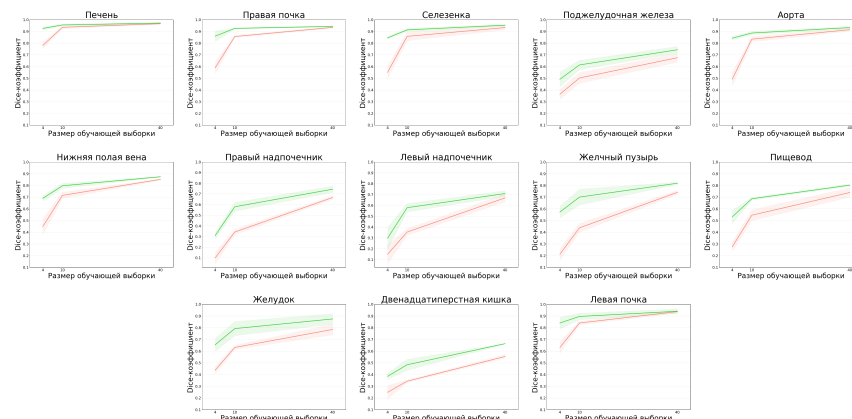


Рис. 2: Сравнение качества сегментации 13 органов на КТ брюшной полости для двух нейросетей: 1) обученной со случайной инициализацией (красный) 2) дообученной после предобучения предложенным методом (зелёный), при разных размерах обучающей выборки.

6 Заключение

Основным результатом данной работы является тот факт, что предложенный метод предобучения позволяет обучать более качественные нейросети

для сегментации анатомических структур по сравнению со случайной инициализацией.

Ограничением данной работы является то, что предложенный метод не сравнивается с другими методами предобучения. Эксперименты с другими методами предобучения, описанными в Секции 2 являются предметом будущей работы.

Список литературы

1. Веб-страница соревнования FLARE2022: <https://flare22.grand-challenge.org/>
2. Chaitanya, K., Erdil, E., Karani, N., Konukoglu, E.: Contrastive learning of global and local features for medical image segmentation with limited annotations. arXiv (Jun 2020)
3. Chen, L., Bentley, P., Mori, K., Misawa, K., Fujiwara, M., Rueckert, D.: Self-supervised learning for medical image analysis using image context restoration. *Medical image analysis* 58, 101539 (2019)
4. Chen, T., Kornblith, S., Norouzi, M., Hinton, G.: A Simple Framework for Contrastive Learning of Visual Representations. arXiv (Feb 2020)
5. Chen, X., He, K.: Exploring Simple Siamese Representation Learning. arXiv (Nov 2020)
6. Goncharov, M., Pisov, M., Shevtsov, A., Shirokikh, B., Kurmukov, A., Blokhin, I., Chernina, V., Solovov, A., Gombolevskiy, V., Morozov, S., Belyaev, M.: CT-Based COVID-19 triage: Deep multitask learning improves joint identification and severity quantification. *Med. Image Anal.* 71, 102054 (Jul 2021)
7. Grill, J.B., Strub, F., Altché, F., Tallec, C., Richemond, P.H., Buchatskaya, E., Doersch, C., Pires, B.A., Guo, Z.D., Azar, M.G., Piot, B., Kavukcuoglu, K., Munos, R., Valko, M.: Bootstrap your own latent: A new approach to self-supervised Learning. arXiv (Jun 2020)
8. Haghighi, F., Taher, M.R.H., Gotway, M.B., Liang, J.: Dira: Discriminative, restorative, and adversarial learning for self-supervised medical image analysis. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. pp. 20824–20834 (2022)
9. Haghighi, F., Taher, M.R.H., Zhou, Z., Gotway, M.B., Liang, J.: Transferable visual words: Exploiting the semantics of anatomical patterns for self-supervised learning. *IEEE transactions on medical imaging* 40(10), 2857–2868 (2021)
10. He, K., Chen, X., Xie, S., Li, Y., Dollár, P., Girshick, R.: Masked Autoencoders Are Scalable Vision Learners. arXiv (Nov 2021)
11. He, K., Fan, H., Wu, Y., Xie, S., Girshick, R.: Momentum Contrast for Unsupervised Visual Representation Learning. arXiv (Nov 2019)
12. Jing, L., Tian, Y.: Self-Supervised Visual Feature Learning With Deep Neural Networks: A Survey. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 43(11), 4037–4058 (May 2020)
13. Kingma, D.P., Ba, J.: Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980 (2014)
14. Lu, J.T., Brooks, R., Hahn, S., Chen, J., Buch, V., Kotecha, G., Andriole, K.P., Ghoshhajra, B., Pinto, J., Vozila, P., Michalski, M., Tenenholtz, N.A.: DeepAAA: Clinically Applicable and Generalizable Detection of Abdominal Aortic Aneurysm Using Deep Learning. In: *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2019*, pp. 723–731. Springer, Cham, Switzerland (Oct 2019)

15. Milletari, F., Navab, N., Ahmadi, S.A.: V-Net: Fully Convolutional Neural Networks for Volumetric Medical Image Segmentation. arXiv (Jun 2016)
16. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T.: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. arXiv (May 2015)
17. Taher, M.R.H., Haghighi, F., Gotway, M.B., Liang, J.: Caid: Context-aware instance discrimination for self-supervised learning in medical imaging. arXiv preprint arXiv:2204.07344 (2022)
18. Taleb, A., Loetzsch, W., Danz, N., Severin, J., Gaertner, T., Bergner, B., Lippert, C.: 3D Self-Supervised Methods for Medical Imaging. arXiv (Jun 2020)
19. Tidwell, A.S.: Advanced imaging concepts: A pictorial glossary of CT and MRI technology. *Clin. Tech. Small Anim. Pract.* 14(2), 65–111 (May 1999)
20. Wu, Z., Xiong, Y., Yu, S., Lin, D.: Unsupervised Feature Learning via Non-Parametric Instance-level Discrimination. arXiv (May 2018)
21. Xie, Z., Lin, Y., Zhang, Z., Cao, Y., Lin, S., Hu, H.: Propagate Yourself: Exploring Pixel-Level Consistency for Unsupervised Visual Representation Learning. *ResearchGate* pp. 16679–16688 (Jun 2021)
22. Yan, K., Cai, J., Jin, D., Miao, S., Guo, D., Harrison, A.P., Tang, Y., Xiao, J., Lu, J., Lu, L.: SAM: Self-supervised Learning of Pixel-wise Anatomical Embeddings in Radiological Images. arXiv (Dec 2020)
23. Zhou, H.Y., Lu, C., Yang, S., Han, X., Yu, Y.: Preservation learning improves self-supervised medical image models by reconstructing diverse contexts. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. pp. 3499–3509 (2021)
24. Zhou, Z., Sodha, V., Pang, J., Gotway, M.B., Liang, J.: Models genesis. *Medical image analysis* 67, 101840 (2021)

Алгоритмы мета-обучения Reptile и MAML в классификации данных ЭЭГ

Даниил Бердышев^{1,2}, Богдан Козырский³

¹ Московский физико-технический институт, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9

² Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, ул. Сретенка, д. 29

berdyshev.da@phystech.edu

³ EURECOM, Biot, France
kozyrski@eurecom.fr

Аннотация Интерфейсы мозг-компьютер напрямую зависят от алгоритма классификации данных, лежащего в их основе. В настоящее время в качестве таких алгоритмов нередко используются нейронные сети. Обучение нейронных сетей требует большого размера обучающей выборки. В силу специфики интерфейсов мозг-компьютер получение большого количества данных для каждого пользователя невозможно. Из-за чего достижение достаточной точности такими алгоритмами — сложная задача. Данная работа посвящена поиску подходящего для решения представленной проблемы алгоритма мета-обучения, его реализации и оценке качества предсказаний.

Результатом этой работы стал выбор двух алгоритмов Reptile и MAML, их реализация и применение для обработки данных ЭЭГ в парадигме интерфейса глаз-мозг-компьютер. Применение данных алгоритмов позволило увеличить скорость дообучения нейросетевого алгоритма EEGNet, а также улучшить точность классификации данных.

Ключевые слова: Reptile, MAML, мета-обучение, нейросети, интерфейс мозг-компьютер

1 Введение

Одним из наиболее часто применяемых в нейронауке методов является электроэнцефалография(ЭЭГ) - неинвазивный метод визуализации мозговой активности, осуществляющий запись электрических потенциалов с поверхности кожи головы. Полученные с помощью этого метода данные сложны для последующей классификации.

Методы машинного обучения позволяют обрабатывать данные в реальном времени и достигнуть высокой точности классификации. Но они имеют ряд сложностей связанных с их обучением и достижением приемлемой точности классификации. Основными направлениями развития алгоритмов

машинного обучения являются: увеличение точности классификации данных, снижение вычислительной стоимости и повышение скорости обучения и приспособления к новым задачам.

Чтобы рассмотреть одну из существующих проблем нейросетей, можно сравнить их с человеком. Человек может использовать свой предыдущий опыт для решения новых задач. Обычная нейросеть на такое не способна. Одним из способов наделяния нейросетевых алгоритмов способностью к использованию предыдущего опыта являются алгоритмы мета-обучения.

Целью этой работы является поиск и оценка оптимального алгоритма мета-обучения в применении к интерфейсам мозг-компьютер.

2 Методы

2.1 Выбранные алгоритмы мета-обучения

Были выбраны два алгоритма мета-обучения, как наиболее перспективные. Так как они не чувствительны к архитектуре сети, что важно по причине бурного развития новых архитектур. Предположительно, позволяют оптимизировать алгоритм на данных всех пользователей, снижая количество необходимых для дообучения данных для каждого пользователя. Увеличивают скорость дообучения алгоритма. Скорость обучения важна в анализе данных ЭЭГ, так как каждый испытуемый сильно отличается от других, что зачастую делает необходимым дообучать нейросетевой алгоритм для каждого испытуемого. Выбранными алгоритмами являются Reptile[4] и MAML[1], давайте обсудим их суть.

Алгоритм Reptile работает с ϕ - вектором стартовых параметров нейросети (её стартовых весов), для начала случайно инициализируем ϕ . В цикле, обучаемая нейросеть на наборе из различных задач - t получает ошибку $L(t)$, после чего считаются новые веса обучаемой нейросети как:

$$\hat{\phi} = \bigcup_t^k(\phi) \quad (1)$$

, в течении нескольких шагов оптимизатора. После чего происходит обновление стартовых весов обучаемой нейросети:

$$\phi \leftarrow \phi + \epsilon(\hat{\phi} - \phi) \quad (2)$$

Где ϵ - скорость обучения мета алгоритма. На этом цикл начинается заново. Этот алгоритм постоянно обучает модель на различных задачах и применяет общий для них градиент, что позволяет искать наиболее подходящие стартовые веса для всего набора задач. Так же алгоритм можно

обучать на небольших выборках из n задач, тогда обновление весов будет выглядеть так:

$$\phi \leftarrow \phi + \epsilon \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{\phi}_i - \phi) \quad (3)$$

Где $\hat{\phi}_i$ веса полученные при обучении внутренней модели на i -той задаче.

Теперь рассмотрим алгоритм MAML. Пусть T - набор задач, α, β - скорости обучения внутреннего и мета алгоритмов соответственно, θ - случайно заданный набор стартовых весов обучаемой модели. Тогда цикл обучения алгоритма на наборе задач T выглядит так: из всех T выбрать K наборов данных x^i, y^i , принадлежащих задаче T^i , :

$$L_{T^i}(f_\theta) = \sum_{x^i, y^i \sim T^i} \|f_\varphi(x^i) - y^i\|_2^2 \quad (4)$$

После чего алгоритмом мета-обучения считаются адаптированные веса обучаемой сети θ , используя ошибки L_{T^i} и точки данных T_i :

$$\theta \leftarrow \theta - \beta \Delta_\theta \sum_{T_i \sim p(T)} L_{T^i}(f_{\theta^i}) \quad (5)$$

2.2 Используемый алгоритм машинного обучения

Выбранные алгоритмы мета-обучения не чувствительны к архитектуре обучаемого алгоритма. Поэтому в качестве базовой нейронной сети был выбран алгоритм EEGNet[[2],[3]], как наиболее используемый в нашей лаборатории. Эта нейросеть выступила в качестве референсной и в качестве обучаемой алгоритмом мета-обучения. EEGNet представляет собой свёрточную нейронную сеть (Рис.1), состоящую из временных и пространственных свёрток, решающую задачу бинарной классификации.

Рассмотрим архитектуру данной сети, она состоит из: $k \times \text{Conv1D}(c \times t)$ — одномерный свёрточный слой c с каналами, t временными точками и k ядрами.

$k \times \text{Conv2D}(c \times t)$ — двумерный свёрточный слой c с каналами, t временными точками и k ядрами.

BatchNorm — пакетная нормализация, приведение данных к виду с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Transpose — транспонирование матрицы.

Maxpool2D — двумерный объединяющий слой max-pooling.

Dropout (p) — слой с вероятностью p обнуляющий выходы предыдущего.

Softmax — функция активации, переводящая ответы нейронов предыдущего слоя в вектор вероятности принадлежности объекта к каждому классу.

Частота дискретизации исходных данных была снижена до 250 Гц. В итоге на вход сети подавались данные размерности $c \times t$, где c - число

Layer	Input dimension	Operation	Output dimension	Parameters number
1	19 x 75	16 x Conv1D	16 x 1 x 75	16*19 + 16
	16 x 1 x 75	(19x1)	16 x 1 x 75	32
	16 x 1 x 75	Batch	1 x 16 x 75	
	1 x 16 x 75	Normalization	1 x 16 x 75	
		Transpose Dropout (0.2)		
2	1 x 16 x 75	4 x Conv2D (2 x	4 x 16 x 75	4*2*32+4=260
	4 x 16 x 75	32)	4 x 16 x 75	8
	4 x 16 x 75	Batch	4 x 8 x 75/4	
	4 x 8 x 75/4	Normalization	4 x 8 x 75/4	
		Maxpool2D (2,4) Dropout (0.4)		
3	4 x 16 x 75	4 x Conv2D (8 x	4 x 8 x 75/4	4*4*8*4+4=516
	4 x 16 x 75	4)	4 x 8 x 75/4	8
	4 x 8 x 75/4	Batch	4 x 4 x 75/16	
	4 x 8 x 75/4	Normalization	4 x 4 x 75/16	
		Maxpool2D (2,4) Dropout (0.6)		
4	4 x 8 x 75/16	Softmax	2	75*2 + 2
Total parameters number				1296

Рис. 1. Архитектура нейросети EEGNet.

каналов ЭЭГ = 19, а t - число временных точек = 75 (интервал длиной в 300 мс., с частотой дискретизации 250 Гц.).

2.3 Данные использованные для оценки алгоритмов

Данные ЭЭГ, используемые в данной работе были получены в эксперименте с игрой "Eyelines"[5]. Во время эксперимента велась запись данных ЭЭГ испытуемых. Полученные таким образом данные, разрезались на эпохи, соответствующие фиксации взгляда. Если фиксация взгляда произошла при активном управлении взглядом, то данные были помечены, как соответствующие намеренной фиксации взгляда. А фиксации взгляда, при неактивном управлении взглядом, помечались как спонтанная фиксация взгляда.

В эксперименте приняли участие 13 испытуемых. Направление взгляда отслеживалось при помощи айтрекера EyeLink 1000 Plus (SR Research, Канада). Запись ээг велась по 19 каналам, при помощи электроэнцефалографа actiChamp (BrainProducts, Германия). Запись данных ЭЭГ была синхронизирована по времени с работой айтрекера, выбирались отрезки данных 200 мс. - 500 мс. , относительно начала фиксации взгляда. Отрезки 0 - 200 мс. не использовались, дабы исключить влияние движения глаз на данные энцефалографа. Регистрация данных велась с частотой 500 Гц. Данные ЭЭГ были отфильтрованы полосовым фильтром с нижней границей 0.1 Гц. и верхней границей 40 Гц. Классификация данных происходит по двум классам: намеренная и не намеренная фиксация взгляда. Наборы данных сбалансированы

по этим классам, отношение намеренных к ненамеренным фиксациям взгляда - 1.6. Общее количество данных по всем испытуемым - 6680 пар метка класс.

3 Результаты

Были выбраны два подходящих алгоритма мета обучения Reptile и MAML. Для обучения и тестирования алгоритмов, данные были разбиты на тестовую и обучающую выборки размером 20% и 80%, обучение происходило с использованием кросс-валидации ($k=5$). Тестовые данные использовались только для оценки качества предсказания алгоритмов. Для алгоритма Reptile, реализован динамический параметр скорости мета-обучения, убывающий по мере обучения. Алгоритм MAML обучался без кросс-валидации (в силу высокой вычислительной стоимости), при помощи оптимизатора Adam. В качестве функции ошибки выступала функция перекрестной энтропии. А для оценки качества классификации использовалась площадь под кривой ошибок. Обучение алгоритмов происходило на данных двенадцати из тринадцати испытуемых. В классификации данных интерфейса мозг-компьютер данные каждого испытуемого можно рассматривать как отдельную задачу. Рассмотрим результаты отражающие скорость дообучения с использованием алгоритма Reptile (Рис.2). Для оценки скорости дообучения использовались данные отдельного испытуемого, не использовавшиеся для обучения алгоритмов. Дообучение происходило в течение 40 эпох.

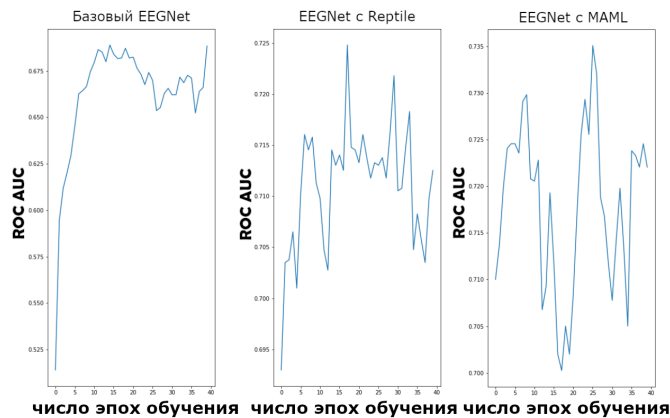


Рис. 2. Графики отражающие скорость обучения.

Из этих графиков видно что, точность по ROC AUC нейросети с применением алгоритмов мета-обучения растёт значительно быстрее чем базовой

нейросети. Это показывает увеличение скорости дообучения при использовании данных алгоритмов мета-обучения.

Теперь рассмотрим оценку качества ROC AUC классификации при использовании алгоритмов Reptile и MAML, в сравнении с базовым алгоритмом. Данная оценка проводилась на тестовой выборке по 12 испытуемым (Рис.3).

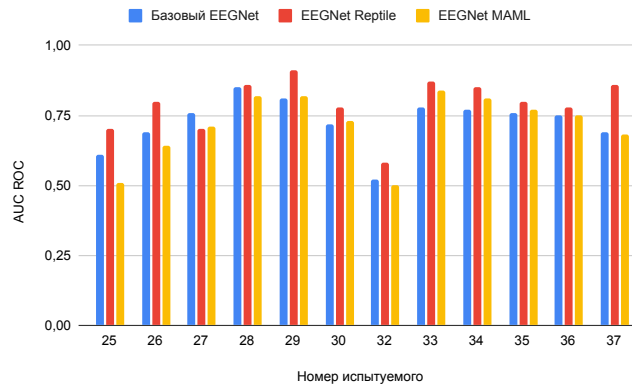


Рис. 3. Диаграмма оценки качества классификации.

На этой диаграмме мы можем видеть, что точность нейронной сети обученной с использованием алгоритма Reptile выше точности референсной сети. Так как, средняя оценка ROC AUC, для нейросети обученной с использованием алгоритма Reptile 0.79 ± 0.09 , для референсной 0.72 ± 0.08 , р-значение по критерию Вилкоксона равно 0.009, что меньше 0.05, это значит что выборки статистически различны. Основываясь на вышесказанном, мы можем утверждать что использование алгоритма Reptile повышает точность классификации данных. При использовании алгоритма MAML мы получаем среднее качество классификации 0.72 ± 0.11 , и р - критерий равный $p=0.504$, из чего мы можем сделать вывод, что в данном случае использование алгоритма MAML не влияет на качество классификации.

4 Заключение

Были найдены подходящие алгоритмы мета-обучения (Reptile, MAML) для задач обработки данных ЭЭГ в условиях интерфейса мозг-компьютер. Алгоритмы Reptile и MAML были протестированы на реальных данных ЭЭГ и показали повышение скорости дообучения, алгоритм Reptile позволил добиться повышения точности классификации, в сравнении со стандартным

применением нейросети EEGNet.

Полученные в работе результаты показывают, что использование алгоритма Reptile, в условиях интерфейса мозг-компьютер, может повысить точность классификации данных. Повышения скорости дообучения, можно добиться используя как Reptile, так и MAML. Что поможет сократить время настройки системы для работы с новым пользователем(испытуемым).

Благодарности Исследование поддержано грантом Российского научного фонда № 22-19-00528.

Список литературы

1. Chelsea Finn, Pieter Abbeel, and Sergey Levine. Model-Agnostic Meta-Learning for Fast Adaptation of Deep Networks. page 13.
2. Bogdan L. Kozyrskiy, Anastasia O. Ovchinnikova, Alena D. Moskalenko, Boris M. Velichkovsky, and Sergei L. Shishkin. Classification of the gaze fixations in the eye-brain-computer interface paradigm with a compact convolutional neural network. *Procedia Computer Science*, 145:293–299, 2018.
3. Vernon J Lawhern, Amelia J Solon, Nicholas R Waytowich, Stephen M Gordon, Chou P Hung, and Brent J Lance. EEGNet: a compact convolutional neural network for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of Neural Engineering*, 15(5):056013, October 2018.
4. Alex Nichol, Joshua Achiam, and John Schulman. On First-Order Meta-Learning Algorithms. page 15.
5. Sergei L. Shishkin, Yuri O. Nuzhdin, Evgeny P. Svirin, Alexander G. Trofimov, Anastasia A. Fedorova, Bogdan L. Kozyrskiy, and Boris M. Velichkovsky. EEG Negativity in Fixations Used for Gaze-Based Control: Toward Converting Intentions into Actions with an Eye-Brain-Computer Interface. *Frontiers in Neuroscience*, 10, November 2016.

Непараметрическая регрессия с возможностью отказа от предсказания

Александр Алексеев^{1,2}, Фёдор Носков³, Максим Панов³

¹ Московский физико-технический институт

² Институт проблем передачи информации РАН

alekseev.av@phystech.edu,

³ Сколковский институт науки и технологий, Москва

Аннотация Оценка неопределённости – это важная проблема для большого количества прикладных задач, решаемых в настоящее время с помощью методов машинного обучения. Имея возможность оценивать уверенность модели в предсказании, можно построить алгоритм отказа от результатов работы метода, для которых получилась большая неопределённость. В данной работе предлагается критерий отклонения предсказаний непараметрической регрессии на основе оценки неопределённости с учётом оценки плотности данных. За основу взята непараметрическая оценка Надарая-Ватсона. Эффективность предложенного метода проверяется на нескольких задачах, включая задачу предсказания траектории движения транспортных средств. Количественные и качественные результаты сравнения с существующим в литературе подходом к задаче непараметрической регрессии с отказом показывают, что предложенный метод может эффективно справляться с задачей и отклонять некачественные предсказания.

Ключевые слова: Непараметрическая регрессия, регрессия с отказом от предсказания, оценка неопределённости

1 Введение

В настоящее время множество прикладных задач сводятся к задаче регрессии. Для отдельных задач важным является выводить не только численный ответ, но и меру определённости модели в предсказании. В такой постановке при большом значении неуверенности модели в ответе задачу можно будет делегировать эксперту или применить другие методы для её решения. Примером задач, для которых применим подобный подход, являются задачи, в которых цена ошибки высока: классификация заболеваний по медицинским изображениям, управление беспилотными транспортными средствами.

Существует много исследований оценки неопределённости для последующего отказа от предсказания. В одной из ранних работ по этой теме вводится риск для классификации с возможностью отказа [4], регрессионный аналог которого используется в данной работе. В работе [5] выведен оптимальный

алгоритм, минимизирующий предложенный в [4] риск. Однако непараметрическая регрессия с возможностью отказа от предсказания изучена достаточно слабо. В статье [2] предложен метод для регрессии с возможностью отказа, этот метод взят за базовый и с ним ведётся сравнение в данной работе. Базовый метод учитывает только алеаторную неопределённость, в то время как предложенный учитывает как алеаторную, так и эпистемическую неопределённость.

2 Задача и предложенный метод

2.1 Общая постановка и модель

Рассматривается задача регрессии. Имеется набор данных $D = \{(X_i, Y_i)\}_{i=1}^n \subset \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}$, где каждый элемент $(X_i, Y_i) \sim \mathbb{P}_{train}$, где \mathbb{P}_{train} – распределение обучающих данных. Определяется целевая функция регрессии $m(x) = \mathbb{E}(Y|X = x)$, также определим условную дисперсию $\sigma^2(x) = \mathbb{D}(Y|X = x)$, не равную нулю ни в какой точке. Тогда можно записать модель следующим образом:

$$Y_i = m(X_i) + \sigma(X_i)\varepsilon_i.$$

Здесь ε_i – это шум, для которого выполнено $\mathbb{E}(\varepsilon_i | X_i) = 0$ и $\mathbb{D}(\varepsilon_i | X_i) = 1$.

В качестве метода для аппроксимации функции регрессии будем использовать оценку Надарая-Ватсона:

$$\hat{m}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i K_h(x - X_i)}{\sum_{i=1}^n K_h(x - X_i)},$$

$$K_h(t) = \frac{1}{h^d} K\left(\frac{t}{h}\right),$$

где K – это ядро. В данной работе используется *RBF*-ядро: $K(t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^d}} e^{-\frac{\|t\|^2}{2}}$.

Регрессия с возможностью отказа. Добавляется возможность отказа от регрессии. Цель – построить функцию $\alpha : \mathbb{R}^d \rightarrow \{0, 1\}$, которая принимает значение 1 для тех аргументов, на которых модель отказывается от предсказания, и 0 в противном случае. Пусть есть оценка $\hat{m}(x)$, которая обучена на данных $D = \{(X_i, Y_i)\}_{i=1}^n$.

Для оценки качества аппроксимации будем использовать среднеквадратичный риск:

$$MSE(\{(X_i, Y_i)\}_{i=1}^n) = \mathbb{E}_D \mathbb{E}_Y ((Y - \hat{m}(X))^2 | X = x).$$

От построенной модели регрессии требуется, чтобы она выдавала малое значение функции ошибки, отказываясь от предсказания для точек с большой неопределённостью и ожидаемо с большой ошибкой предсказания.

Для регрессии с возможностью отказа можно ввести понятие доли отвергнутых точек (на английском "rejection rate"): $r(\alpha) = \mathbb{P}\{\alpha(X) = 1\}$. Искомая модель регрессии должна минимизировать среднеквадратичный риск и отклонять точки, дающие большую ошибку. Чтобы скомпенсировать вклад среднеквадратичной ошибки и отказа от предсказания, вводится гиперпараметр λ , смысл которого – штраф модели за отказ от предсказания. Тогда можно определить поточечную функцию потерь следующим образом:

$$\mathcal{R}_{\lambda,\alpha}(x) = \mathbb{E}_Y ((Y - \hat{m}(X))^2 I\{\alpha(X) = 0\} | X = x) + \lambda I\{\alpha(x) = 1\}.$$

Условная дисперсия может быть записана как $\sigma^2(x) = \mathbb{E}_Y((Y - m(X))^2 | X = x)$. Тогда функция α_λ , которая минимизирует риск $\mathcal{R}_{\lambda,\alpha}(x)$, выглядит следующим образом:

$$\alpha_\lambda(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma^2(x) \geq \lambda, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Формула Надарая-Ватсона для оценки неопределённости. Для оценки условной дисперсии $\sigma^2(x)$ предлагается использовать её непараметрическую оценку, которую позволяет получить формула Надарая-Ватсона. Используем разложение $\sigma^2(x) = \mathbb{E}(Y^2|X = x) - (\mathbb{E}(Y | X = x))^2$, тогда $\hat{\sigma}^2(x) = \hat{\nu}(x) - \hat{m}^2(x)$, где $\hat{\nu}(x)$ – это оценка для $\mathbb{E}(Y^2|X = x)$, которая выражается следующим образом: $\hat{\nu}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2 K_h(x-X_i)}{\sum_{i=1}^n K_h(x-X_i)}$.

Вспомогательное утверждение об асимптотической нормальности. Пусть ширина ядра h_n , зависящую от n , удовлетворяет заданным условиям: $h_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 0$, $\lim_{n \rightarrow \infty} nh_n^d > 0$. В работе [3] показано, что при данных условиях на ширину ядра и условиях на конечность и непрерывность определённых моментов Y (секция 2.2 в работе) существует следующая сходимость (по распределению):

$$\sqrt{nh_n^d} \frac{\hat{\sigma}^2(x) - \sigma^2(x) - \theta_n(x)}{\sigma_V} \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \mathcal{N}(0, 1),$$

где $\theta_n = \frac{h_n^2}{2} \sigma_V^2 \frac{d^2}{dx^2} \sigma^2 + o(h_n^2)$, а величины σ_V и ψ определяются следующим выражением (ε – стандартный нормальный шум, $p(\cdot)$ – маргинальная плотность X): $\sigma_V = \sigma^2(x) \psi(x) \sqrt{\frac{\int_{\mathbb{R}^d} K^2(t) dt}{p(x)}}$, $\psi^2(x) = \mathbb{E}[(\varepsilon^2 - 1)^2 | X = x] = \mathbb{E}\varepsilon^4 - 1 = 2$

В данной работе предлагается брать $h_n = \frac{n^{-\frac{d+4}{d}}}{\log n}$. Тогда, используя теорему Слуцкого, утверждение можно переписать в следующем виде:

$$\sqrt{nh_n^d} \frac{\hat{\sigma}^2(x) - \sigma^2(x)}{\sigma_V} \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \mathcal{N}(0, 1).$$

В качестве оценки истинной плотности $p(x)$ используется ядерная оценка плотности $\hat{p}(x) = \sum_{i=1}^n K_h(x - X_i)$.

Также следует отметить, что если $K(t)$ – это RBF-ядро, то для интеграла в определении σ_V будет верно следующее:

$$\int_{\mathbb{R}^d} K^2(t) dt = (2\pi)^{-d} \left[\int_{\mathbb{R}} e^{-t^2} dt \right]^d = (4\pi)^{-d/2}.$$

2.2 Критерий

Задача формализуется так: требуется построить статистический тест для проверки нулевой гипотезы $H_0 : \sigma^2(x) > \lambda$ против альтернативы $H_1 : \sigma^2(x) \leq \lambda$.

Базовый метод. Базовый метод взят из статьи [2]. Идея в том, чтобы использовать оценку $\hat{\sigma}^2(x)$ для неопределённости $\sigma^2(x)$, полученную с помощью оценки Надарая-Ватсона. Итоговая функция отказа для базового метода $\hat{\alpha}(x)$ задаётся выражением

$$\hat{\alpha}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } \hat{\sigma}^2(x) \geq \lambda, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (1)$$

Предложенный метод. Все необходимые оценки для $\sigma^2(x)$, $p(x)$, $m(x)$, $\sigma_V(x)$ могут быть получены с помощью метода Надарая-Ватсона, с помощью этих оценок можно составить критерий отказа. Воспользуемся полученным выше утверждением об асимптотической нормальности. Тогда, обозначив $1 - \beta$ -квантиль нормального распределения как $z_{1-\beta}$, можем записать, пользуясь определением квантиля,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P} \left(\sqrt{nh^d} \frac{\hat{\sigma}^2(x) - \sigma^2(x)}{\hat{\sigma}_V} \leq -z_{1-\beta} \right) \leq \beta.$$

Подставим в данное выражение определение σ_V , тогда получим

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P} \left(\hat{\sigma}^2(x) \leq \sigma^2(x) \left[1 - \frac{C z_{1-\beta}}{\sqrt{nh^d \hat{p}(x)}} \right] \right) \leq \beta.$$

Здесь для простоты записано $C = \sqrt{2} \cdot (4\pi)^{-\frac{d}{4}}$. Пусть выполнена нулевая гипотеза и $\sigma^2(x) > \lambda$. Тогда, если заменить в предыдущем неравенстве $\sigma^2(x)$ на меньшее число λ , то вероятность получившегося события может только уменьшиться. Тогда верно следующее неравенство:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P} \left(\hat{\sigma}^2(x) \leq \lambda \left[1 - \frac{C z_{1-\beta}}{\sqrt{nh^d \hat{p}(x)}} \right] \right) \leq \beta.$$

Таким образом, принимаем предсказание модели в точке x тогда и только тогда, когда

$$\hat{\sigma}^2(x) \leq \lambda \left[1 - \frac{Cz_{1-\beta}}{\sqrt{nh^d \hat{p}(x)}} \right]. \quad (2)$$

Из (2) следует, что при β , меньших 0.5, количество точек в выборке, на которых предложенный метод отказывается, будет больше, чем у базового метода (т.к. коэффициент при λ в правой части выражения будет меньше 1. Если $\beta > 0.5$, то, наоборот, предложенный метод будет отказываться от предсказаний реже, чем базовый метод. Таким образом, с помощью параметра β можно варьировать долю принятых точек.

Псевдокод алгоритма:

Алгоритм 2.1 Критерий отказа

Вход: Обучающая выборка (X_i, Y_i) , ширина ядра h , параметры λ, β , точка x

1: Посчитать $\hat{p}(x), \hat{\sigma}^2(x), \hat{m}(x)$

2: **Если** $\hat{p}(x) > 0$ и выполняется:

$$\hat{\sigma}^2(x) \leq \lambda \left[1 - \frac{\sqrt{2}(4\pi)^{-d/4} z_{1-\beta}}{\sqrt{nh^d \hat{p}(x)}} \right]$$

то принять результат регрессии $\hat{m}(x)$

3: **Иначе** отклонить

4: **Конец Если**

3 Эксперименты

Для проведения экспериментов на синтетических данных использовались выборки, сгенерированные на основе predetermined функций для среднего и дисперсии с добавлением случайного шума из стандартного нормального распределения:

$$Y_i = m(X_i) + \sigma(X_i)\varepsilon_i, \quad \varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, 1). \quad (3)$$

Данные X_i генерировались из бета-распределения $\beta(4, 2)$.

В качестве табличных данных было выбрано три набора из открытой базы UCI Machine Learning Repository [1]: Airfoil Self-Noise, Bias correction of numerical prediction model temperature forecast, Seoul Bike Sharing Demand.

3.1 Описание данных

Набор данных Airfoil Self-Noise представляет собой таблицу, содержащую 503 записи о результатах испытаний NASA секций лопасти аэродинамиче-

ского профиля в безэховой аэротрубе. Для каждого объекта имеются данные: частота (в Герцах), угол атаки (в градусах), длина хорды (в метрах), скорость набегающего потока (в метрах в секунду), толщина смещения стороны всасывания (в метрах). Целевой переменной является масштабированный уровень звукового давления (в децибелах).

Набор данных Bias correction of numerical prediction model temperature forecast - таблица с 7750 записями. Эти данные предназначены для коррекции погрешности прогноза максимальной и минимальной температуры воздуха на следующие сутки модели предсказания погоды, используемой Корейским метеорологическим управлением над Сеулом, Южная Корея. Эти данные состоят из летних данных с 2013 по 2017 год. Входные данные в основном состоят из данных прогноза на следующий день модели, максимальных и минимальных температур на месте в настоящее время и географических вспомогательных переменных. В этих данных есть два выхода (т. е. максимальная и минимальная температура воздуха на следующий день). После предобработки данные содержат 13 признаков для каждого объекта.

Набор данных Seoul Bike Sharing Demand содержит 8760 записей об аренде велосипедов в Сеуле в конкретный день. Каждая запись содержит следующие атрибуты: количество велосипедов, арендованное за час, текущий час, влажность (в процентах), скорость ветра (в метрах в секунду), видимость (в метрах), солнечная радиация (в Ваттах на квадратный метр), температура точки росы (в градусах Цельсия), количество осадков в виде дождя (в миллиметрах), количество осадков в виде снега (в миллиметрах), бинарный признак, обозначающий, является ли день праздником, и бинарный признак, обозначающий, является ли текущее время рабочим. В качестве целевой переменной выступает количество арендованных велосипедов за час.

3.2 Визуализация работы метода на синтетических данных

Была проведена серия экспериментов по оценке эмпирического риска для синтетических данных. Данные (X_i, Y_i) генерировались согласно (3), где $m(x) = \exp(3x)$, $\sigma(x) = \frac{1}{5} \sin(10x)$. Точки x генерировались из распределения $\beta(4, 2)$. Была выдвинута гипотеза, что предложенный метод будет работать значительно лучше, чем базовый метод в случае «out of distribution», когда тестовые данные значительно отличаются от обучающих. Целесообразность этой гипотезы объясняется тем, что наш метод явно учитывает оценку плотности данных в критерии отказа, и в случае, когда для точки из тестовой выборки все элементы обучающей выборки будут достаточно удалены от неё, оценка плотности будет мала, и критерий выдаст отказ от регрессии. Все данные X_i лежат в интервале $(0, 1)$. Был выбран интервал $(0.3, 0.55)$, и все точки, попавшие в этот интервал, считались тестовыми. Также в тестовый интервал добавлялись случайным образом точки из $(0, 1) \setminus (0.3, 0.55)$. Предсказания были подсчитаны с помощью оценки Надарая-Ватсона, затем были применены предложенный критерий отказа и критерий отказа для базового метода. Параметр $\beta = 0.05$ зафиксирован,

параметр λ варьировался, эксперименты были проведены для 100 различных значений параметра, равноудалённых между собой на отрезке $[0.1, 10]$.

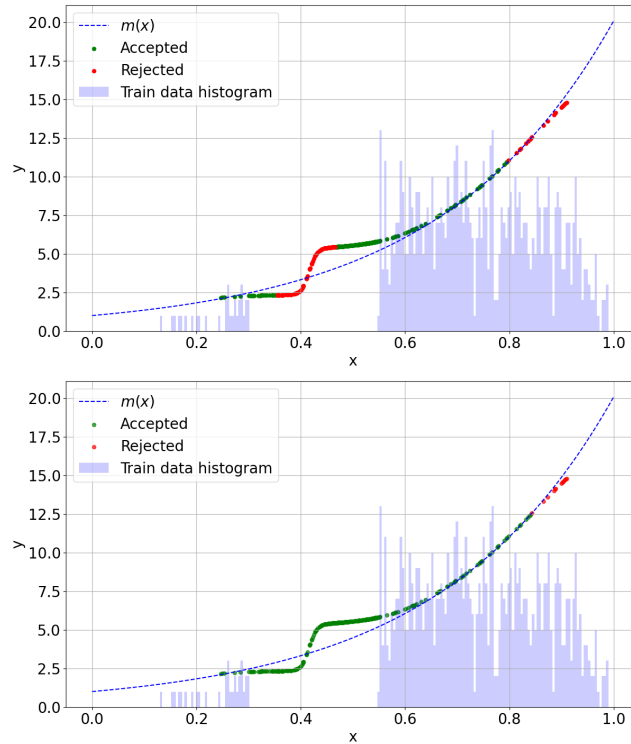


Рис. 1: Графики предсказаний регрессии на синтетических данных. Гиперпараметры метода $\beta = 0.05$, $\lambda = 2.6$. В красных точках согласно критерию отказываемся от регрессии, в зелёных – принимаем предсказания. Пунктирная линия – это целевая функция $m(x)$. На график добавлена гистограмма обучающей выборки. Верхний график – результат работы предложенного критерия, нижний – результат работы базового метода.

Результаты данного эксперимента для $\lambda = 2.6$ представлены на Рис. 1. Как можно видеть, при данных гиперпараметрах предложенный метод более осторожен, он отказывается от предсказания в точках, для которых модель плохо уловила целевую зависимость. Базовый метод принимает почти все точки.

3.3 Эксперименты на табличных данных

Для выборки Airfoil Self-Noise искусственно был смоделирован случай различия в распределениях обучающих и тестовых данных. Разбиение данных на обучающую и тестовую выборку происходило по первому признаку из набора данных: те объекты, для которых значение этого признака больше выборочного 0.7-квантиля, попадают в тестовую выборку, остальные объекты попадают в обучающую выборку.

Для выборок Bias correction of numerical prediction model temperature forecast и Seoul bike sharing demand разбиение данных на обучающую и тестовую выборку произведено по временному признаку. Выбрана отсечка по времени, такая, что 70% данных, дата наблюдений для которых предшествует дате отсечки, попали в обучающую выборку, а остальные 30% данных попали в тестовую выборку.

Была составлена равномерная сетка по параметру λ , содержащая 100 значений на отрезке $[0, 50]$ для выборки Airfoil Self-Noise, 100 значений на отрезке $[0, 2]$ для выборки Bias correction of numerical prediction model и 100 значений на отрезке $[0, 10^6]$ для выборки Seoul bike sharing demand. Для каждого λ на получившейся сетке для каждой точки тестовой выборки был запущен предложенный алгоритм отказа от регрессии. Как результат, для каждого значения λ есть набор принятых и отвергнутых точек. Замерялись выборочное среднее для риска $\mathcal{R}_{\lambda, \hat{\alpha}}$, а также среднеквадратичная ошибка. Также есть графики зависимости этих величин от доли принятых точек.

Результаты экспериментов представлены на Рис. 2, Рис. 3 и Рис. 4. На каждом рисунке верхний график отображает зависимость риска $\mathcal{R}_{\lambda, \hat{\alpha}}(x)$ от гиперпараметра λ для базового и предложенного методов. Нижний график отображает зависимость среднеквадратичной ошибки от доли принятых точек выборки. На каждой выборке предложенный метод был запущен с несколькими значениями параметра β . Линии, соответствующие каждому значению β , изображены на графике и подписаны.

Рассмотрим выборку Airfoil Self-Noise. Как видно из графиков, предложенный метод имеет значительно меньший риск, чем базовый метод. Особенно различие проявляется в области с низкой долей принятых точек. Видно, при низкой доле принятых точек базовый метод принимает не самые оптимальные точки (т.к. ошибка на этих точках больше ошибки в среднем по выборке при всех принятых ответах), в то время как предложенный метод выбирает более оптимальные точки. Для $\beta = 0.1$ можно сказать, что среднеквадратичная ошибка почти монотонно зависит от доли принятых точек, т.е. критерий сортирует точки, и в первую очередь принимает точки с наименьшей ошибкой.

Для выборки Bias correction of numerical prediction model temperature forecast качественно наблюдается похожая ситуация. В области малых λ и при низкой доле принятых точек предложенный метод показывает значительное улучшение в терминах риска по сравнению с базовым методом. Большой пик и превышение средневыворочного значения риска показывают, что базовый метод выбирает не оптимальные с точки зрения ошибки

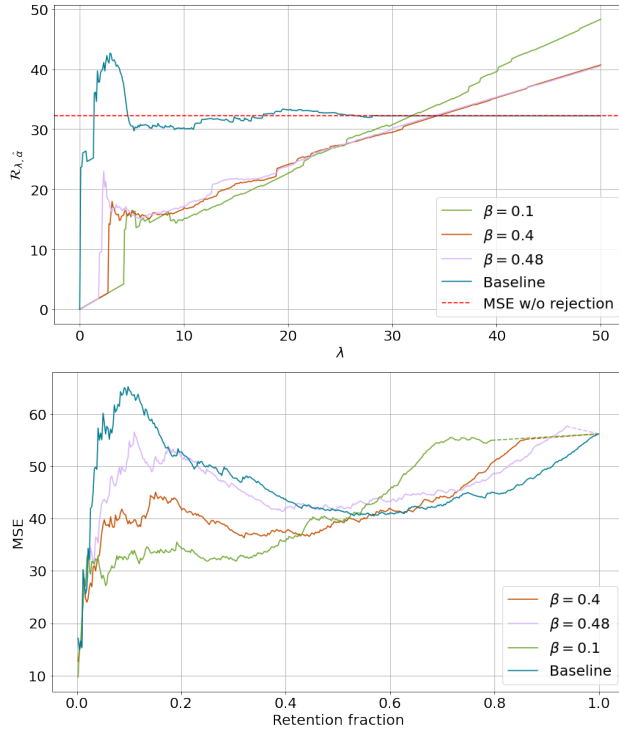


Рис. 2: Результаты работы методов на выборке Airfoil Self-Noise. Сверху: график зависимости средневыборочного риска $\mathcal{R}_{\lambda, \hat{\alpha}}$ базового метода и предложенного метода от гиперпараметра λ . Пунктирной линией отображена зависимость среднеквадратичного риска от параметра λ в случае, если принимаем все точки тестовой выборки. Снизу: график зависимости среднеквадратичной ошибки методов от доли принятых точек.

элементы выборки. Предложенный метод для малых β демонстрирует значительно лучшие результаты, особенно при $\beta = 0.001$, когда зависимость риска от λ и от доли принятых точек почти монотонные.

Для выборки Seoul Bike Sharing критерий работает хорошо как для базового, так и для предложенного методов. При низких λ кривые риска ведут себя почти линейно, что означает, что методы в основном отклоняют предсказания. При больших λ предложенный метод с $\beta = 0.8$ имеет меньший риск, чем базовый метод. Как видно на графике зависимости ошибки от доли принятых точек, методы ведут себя примерно одинаково, в некоторых

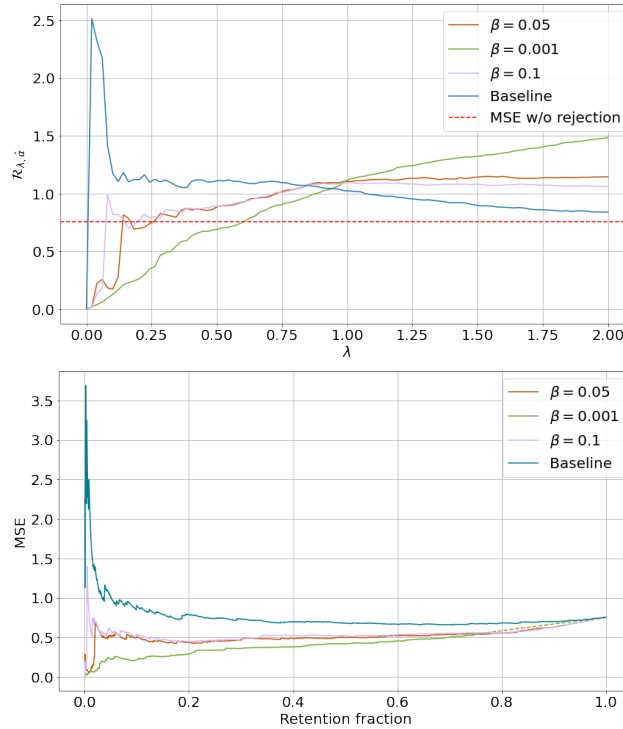


Рис. 3: Результаты работы методов на выборке Bias correction of numerical prediction model temperature forecast. Сверху: график зависимости средневыборочного риска $\mathcal{R}_{\lambda, \hat{\alpha}}$ базового метода и предложенного метода от гиперпараметра λ . Пунктирной линией отображена зависимость среднеквадратичного риска от параметра λ в случае, если принимаем все точки тестовой выборки. Снизу: график зависимости среднеквадратичной ошибки методов от доли принятых точек.

областях предложенный метод показывает лучшие результаты, чем базовый.

4 Заключение

В данной работе предложен метод аппроксимации неопределённости для непараметрической регрессии методом Надарая-Ватсона. Преимуществом предложенного метода является учёт ядерной оценки плотности данных при построении критерия отказа от предсказания. Качество работы метода оце-

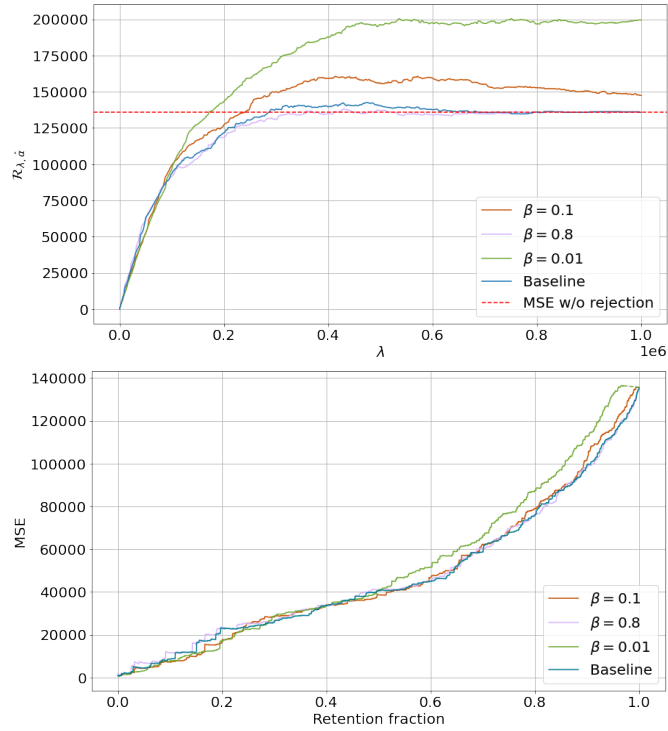


Рис. 4: Результаты работы методов на выборке Seoul bike sharing demand. Сверху: график зависимости средневыборочного риска $\mathcal{R}_{\lambda, \hat{\alpha}}$ базового метода и предложенного метода от гиперпараметра λ . Пунктирной линией отображена зависимость среднеквадратичного риска от параметра λ в случае, если принимаем все точки тестовой выборки. Снизу: график зависимости среднеквадратичной ошибки методов от доли принятых точек.

нено на синтетически сгенерированных данных, на трёх табличных наборах данных и на наборе данных для задачи предсказания траектории транспортных средств.

Исходя из результатов экспериментов, можно сделать вывод, что для определённого набора задач предложенный метод может успешно справляться с поставленной задачей и отклонять некачественные предсказания. Однако в терминах метрик предложенный метод далеко не всегда работает лучше базового алгоритма и требует тщательной настройки гиперпараметров. Недостаточно хорошее качество работы метода для конкретной задачи может объясняться плохой применимостью непараметрической оценки к

задаче в целом, особенностями выборки и размерностью признакового пространства, неправильно подобранными гиперпараметрами.

Список литературы

1. Dua, D. & Graff, C. UCI Machine Learning Repository. (University of California, Irvine, School of Information,2017), <http://archive.ics.uci.edu/ml>
2. Denis, C., Hebiri, M. & Zaoui, A. Regression with reject option and application to kNN. (arXiv,2020)
3. Fan, J. & Yao, Q. Efficient Estimation of Conditional Variance Functions in Stochastic Regression. *Biometrika*. **85**, 645-660 (1998)
4. Chow, C. On optimum recognition error and reject tradeoff. *IEEE Transactions On Information Theory*. **16**, 41-46 (1970,1), Conference Name: IEEE Transactions on Information Theory
5. Herbei, R. & Wegkamp, M. Classification with Reject Option. *The Canadian Journal Of Statistics / La Revue Canadienne De Statistique*. **34**, 709-721 (2006), Publisher: [Statistical Society of Canada, Wiley]

Алгоритм оценки распределения параметров освещения в сцене по её изображению

Василий Тесалин^{1,2,3}, Егор Ершов¹

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия,

² Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия,

³ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

tesalin.vv@phystech.edu

Аннотация Баланс белого – классический шаг всех современных конвейеров формирования изображений – выполняется, чтобы скомпенсировать влияние источника освещения, воспроизводя тем самым механизм цветовой константности зрительной системы человека. В современных устройствах методы автоматического баланса белого работают в предположении, что в сцене присутствует единственный доминантный источник освещения. Однако во многих реальных сценах зачастую несколько источников освещения (солнце и небо, свет лампы и свет из окна и т.д.), излучение от которых в разных пропорциях смешивается и отражается от плоской калибровочной поверхности, формируя целое распределение физически корректных оценок освещения для различных её ориентаций. Последнее необходимо учитывать при выполнении баланса белого, в том числе для моделирования неполной цветовой адаптации к конкретному источнику освещения. Отвечая на эту необходимость, в данном исследовании рассматривается задача оценки распределения источников освещения, частным случаем которой является освещение одним источником. В работе описывается новый набор данных, состоящий из 3812 изображений и соответствующих им распределений освещения, полученный на основе набора данных Cube++. Для оценки распределения использовалась отраженная в зеркальном шаре цветовой мишени SpyderCube сцена. Предложен метод адаптации классических алгоритмов цветовой константности для оценки распределения источников освещения. Также предложено нейросетевое решение поставленной задачи. Проведена численная оценка их качества с использованием дискретной реализации метрики Васерштейна, называемой неформально метрикой землекопа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: баланс белого, оценка освещения, цветовая адаптация, цветовая репродукция, цветовая константность, обработка изображений.

1 Введение

Задача оценки освещения в сцене по изображению или, как её часто называют, задача вычислительной цветовой константности, является классической и широко исследуемой задачей, особенно в модели одного источника



Коррекции с использованием трёх различных точек белого

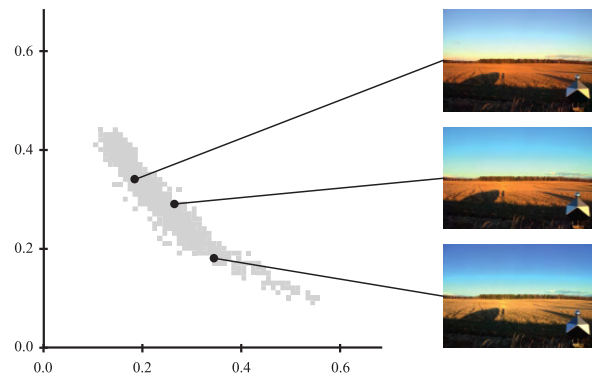


Рис. 1. На этом рисунке показано распределение освещения, оцененное по входному изображению, и три различные коррекции, полученные с использованием разных точек белого, выбранных из распределения. α и β - координаты цветности.

освещения [1]. Её решение необходимо для работы современных конвейеров формирования и воспроизведения цветных изображений [2], а сама задача является актуальной, о чем свидетельствует не уменьшающийся темп публикаций научных работ по данной тематике. Интересно отметить, что до 2011 года почти все наборы данных [4, 5] представляли собой набор пар “изображение – точка белого”¹. Как правило точка белого (за исключением наборов данных Grey Ball [3] и Flying Grey Ball [17]) оценивалась путём усреднения цвета ахроматической плоской поверхности, ориентация которой не контролировалась. В результате, исследователям и разработчикам новых решений неявно ставилась задача не просто оценить параметры освещения в сцене, но и предугадать ориентацию цветовой мишени по изображению, где она замаскирована. Исключением здесь, пожалуй, стоит назвать набор данных Cube+ [33], где однородность освещения контролировалась путём проверки сходства точек белого, подсчитанных по двум разным граням цветного куба. Важно отметить, что ориентация ахроматической поверхности – это фактор, которым нельзя пренебрегать. Например, на некоторых изображениях из набора Cube++ угол между векторами цветов ахроматических граней калибровочного куба достигает 15 градусов [7]. В контексте этого особенно удивительно видеть работы по предсказанию одной точки белого, где заявляется точность меньше 2 градусов [15]. Описанное противоречие наглядно демонстрирует несоответствие разметки существующих наборов данных сложности решаемой задачи – для сцен со сложным освещением требуется исключить ориентацию ахроматической поверхности как случайный фактор путём добавления в разметку распределения всех возможных цветов этой поверхности. Представленная работа нацелена на решение данной проблемы.

В действительности, около половины изображений содержат сцены со сложным освещением [7], которое не может быть корректно описано моделью доминантного источника. Несмотря на это, множество современных устройств оснащены конвейерами формирования цветных изображений, качество которых устраивает конечных пользователей [11–14]. Отсюда можно сделать вывод, что классической постановки доминантного источника освещения достаточно на практике. Однако определение распределения присутствующих параметров освещения в сцене, как показано на рисунке 1, открывает возможность персонализации при коррекции изображения с сохранением физической корректности.

Отдельно стоит отметить задачу аугментации данных в контексте оценки доминантного источника освещения. На практике аугментация путём поэлементного домножения изображения на случайно выбранную точку белого приводит к ухудшению результата, что объясняют возникновением нереалистичных цветов – в изображениях природы не может возникать зелёных источников освещения [16]. Возможность аугментации на основе распреде-

¹ Точка белого – это наблюдаемый цвет источника освещения в сцене без учета его яркости (т.е. его цветность).

ления физически реализуемых цветностей ахроматической поверхности в сцене может позволить решить данную проблему.

С использованием набора данных Flying Grey Ball [17] было проведено исследование с целью выяснить, действительно ли для разных пользователей предпочтительны разные оценки освещения. В случае положительного ответа на этот вопрос, появляется дополнительный аргумент в пользу необходимости определять именно распределение параметров освещения в сцене. Набор данных Flying Grey Ball ценен тем, что авторы сопровождают его множеством оценок освещения в сцене, что позволяет провести предварительные исследования предпочтения, однако не позволяет строить нейросетевые решения, поскольку набор данных состоит всего из 31 сцены. Для 10 сцен

были сгенерированы результаты коррекции с 3 разными точками белого, измеренными создателями набора данных. После этого семи испытуемым были поочередно предъявлены сгенерированные тройки изображений в одинаковых условиях наблюдения и задан вопрос: “Какое изображение вы считаете наиболее красивым?”. Ниже на рисунке 3 приведены результаты опроса для 4 сцен, откуда видно, что мнения испытуемых расходятся. Этот факт, пусть и с небольшой статистической значимостью, иллюстрирует разнообразие цветовых предпочтений человека, что приводит к необходимости прогнозирования распределения параметров освещения для каждой сцены для обеспечения возможности персонализации. Аналогичные эксперименты проводились при проведении международного соревнования [36], где требовалось сравнить сгенерированные разными методами изображения ночных сцен.

Совокупность всех перечисленных факторов и послужила мотивом для проведения описанных в данной статье работ. Перед авторами стояла задача оценить распределение параметров освещения в сцене по ее изображению. Для её решения был подготовлен новый набор данных, на котором была проведена адаптация базовых алгоритмов, опирающихся на предположение о единственном источнике освещения. Для оценки качества этой адаптации использовалась метрика землекопа.

В рамках подготовки набора данных были отобраны 3812 изображений из набора данных Cube++, которые соответствуют поставленной задаче. Для формирования оценки распределения источников освещения в сцене использовался зеркальный шар цветовой мишени SpyderCube, которая продемонстрирована на рисунке 2. Безусловно такой способ не позволяет точно оценить параметры распределения, однако в работе показано, что путём последовательного применения процедур обработки данных возможно по-

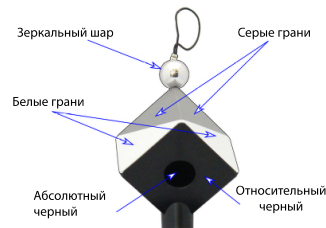


Рис. 2. Цветовая мишень SpyderCube.



Рис. 3. Распределение голосов за разные коррекции изображений.

лучить удовлетворительное первое приближение. Также предложено нейросетевое решение. Для оценки качества предсказания параметров распределения использовалась метрика землекопа.

2 Создание набора данных

В данной главе описана методика создания дополнительной разметки для набора данных Cube++ и формирования распределения параметров освещения для каждой сцены.

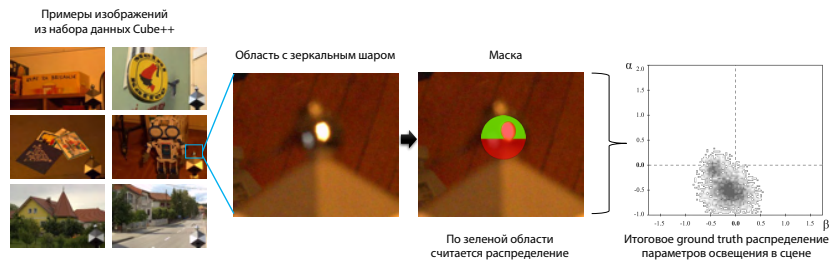


Рис. 4. Иллюстрация методики формирования разметки распределения параметров освещения в сцене по замаскированной верхней половине зеркального шара цветовой мишени SpyderCube.

2.1 Разметка набора данных Cube++

Была дополнена разметка набора данных Cube++, который состоит из 4890 сырых 16-ти битных изображений в формате .png, снятых на три разные камеры Canon 600D с одинаковым сенсором. Разрешение изображений – 72 по обоим направлениям. Исходно, на каждом изображении были размечены только ахроматические грани цветовой мишени SpyderCube. Используя разметку граней, для каждого изображения ранее были рассчитаны две оценки цветностей источников освещения – по одной на каждую грань. На рисунке 4 показаны несколько примеров изображений из набора данных.

Для оценки распределения параметров освещения в данной работе использовался зеркальный шар, закреплённый на верху цветовой мишени. Опишем детальнее процедуру подготовки новой разметки и набора данных.

На первом шаге работа проводилась с прямоугольными областями, содержащими цветовую мишень SnyderCube, находящуюся в правой нижней части каждого изображения набора данных Cube++ (координаты [700 : 1000] от правого нижнего угла изображения). Для каждой такой области была вручную подготовлена полигональная маска зеркального шара, содержащая в среднем 16 точек. Кроме того, помимо маски зеркального шара в разметку для каждого изображения была добавлена информация о локальном максимуме исходного изображения, из которого было вычтено 50 по рекомендациям авторов Cube++. С помощью этого значения в дальнейшем определялось значение зашкала.

2.2 Формирование распределений освещения в сцене

Далее по маске для каждого изображения формировалась содержащая зеркальный шар область. Средний размер такой области составил 86×89 пикселей. На втором шаге из полученной маски зеркального шара убиралась нижняя половина (в предположении, что источники освещения находятся в верхней полусфере), а также область тёмных и зашкаленных пикселей, как выделено на рисунке 4. Изображения с масками, где 50% пикселей зашкалены или недосвечены (т.е. содержали значение меньше 2048), удалялись из набора. Набор данных, полученный с помощью такой операции маскирования, состоит из 3812 изображений.

Далее описан способ получения оценки распределения цветностей с использованием полученной маски. Для приведения чёрной точки в ноль системы координат из значений пикселей изображения был вычтен темновой ток (2048), аналогично оригинальной работе. Для удаления шума с замаскированной части зеркального шара использовался алгоритм bm3d [18] с параметром шума 200 (сигма).

После операции шумоподавления исходные значения (R,G,B) пикселей были спроецированы на плоскость цветности ($\alpha = \frac{2B-(R+G)}{R+G+B}$, $\beta = \frac{\sqrt{3}(R-G)}{R+G+B}$) [19]. Такая проекция выбрана вместо классической ($r = \frac{R}{G}$, $b = \frac{B}{G}$) не случайно. При нахождении расстояния между двумя гистограммами важно одинаково учитывать все исходные цвета. Для полученных проекций пикселей строилась двумерная гистограмма, используя сетку 116×100 , с шагом дискретизации 0.03 по каждому измерению в плоскости (α, β).

Затем всем ненулевым ячейкам присваивалось значение 1, в результате чего формировалось распределение параметров освещения. Таким образом сохраняется информация о наличии той или иной белой точки в сцене, но устраняется возможность неверной интерпретации численного значения, как вероятности, либо степени предпочтительности. Интересно отметить, что таким действием устраняется информация о линейных размерах источника, но она может быть восстановлена из исходных данных и разметки.

В результате экспериментов с шумоподавлением изображений зеркальных шаров с замаскированными пикселями стало ясно, что эта процедура может порождать артефакты, поскольку происходит линейное смешивание зашкренных и незашкренных пикселей. Для устранения этого пагубного влияния на форму гистограммы и соответствующего распределения были оставлены только те пиксели, которые присутствовали в распределении, полученном аналогичным образом из значений пикселей замаскированной части зеркального шара без шумоподавления.

На следующем шаге, чтобы устранить несвязные кластеры небольшого размера и повысить степень связанности основных кластеров, с распределением производились морфологические операции. Далее применялась операция открытия с ядром (3, 2) (эти параметры получены экспериментально). После этого гистограмма смещалась на одну ячейку влево, чтобы скомпенсировать сдвиг, возникший из-за четности одного из измерений ядра в используемой реализации операции открытия.

Далее производился анализ компонент связности гистограммы. Каждому изображению набора данных Cube++ была сопоставлена одна из 3 меток – ['indoor', 'outdoor', 'unknown'], характеризующая условия съемки. В рамках этой работы каждому изображению с меткой 'unknown' была сопоставлена метка 'indoor' или 'outdoor'. Было замечено, что в случае, когда гистограмма состоит из более чем одного компонента связности, характер этих компонент для 'indoor' и 'outdoor' изображений разный. В случае 'indoor' коррекции, соответствующие наименьшим компонентам связности, получались визуально неправдоподобными. В случае 'outdoor', напротив, коррекции, соответствующие всем компонентам связности, получались визуально правдоподобными. Таким образом, было решено оставить одну наибольшую компоненту связности для 'indoor' изображений и все компоненты для 'outdoor'.

После анализа компонент связности по гистограмме строилась ее выпуклая оболочка с помощью алгоритма Грэхема [37]. Использование выпуклой оболочки гистограммы необходимо, т.к. гистограмма, полученная с использованием предыдущих шагов может оказаться не выпуклой или состоящей из нескольких компонент связности, что противоречит закону Грассмана [38].

Наконец, полученное распределение дополнялось нулями по краям, чтобы получить окончательное ground truth распределение для каждого изображения размера 128×128 , как показано на рисунке 4.

На рисунке 5 проиллюстрированы изменения, которые происходят с распределением в ходе последовательного применения каждого шага.

Для проверки корректности предложенного способа генерации набора данных и консистентности с существующим набором данных было проверено, что отрезок, соединяющий оценки источников, полученных по серым граням цветовой мишени, лежит для большинства изображений в полученном распределении. Также результаты допустимых согласно полученному набору данных коррекций были тщательно проверены органолептически.

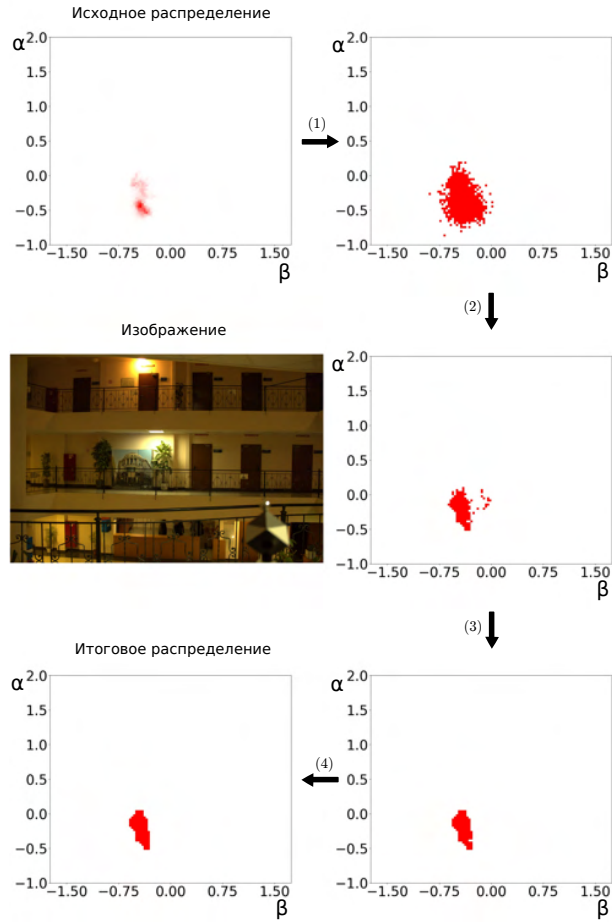


Рис. 5. Пример эволюции набора данных: (1) – бинаризация распределения; (2) – применение *bm3d* к распределению; (3) – применение операции открытия к распределению; (4) – итоговый вид распределения.

3 Алгоритмы

Далее в статье пойдет речь об использованных алгоритмах, но до этого стоит напомнить, как выглядит общепринятая модель формирования: [34]

$$f_c(\mathbf{x}) = \int_{\omega} I(\lambda, \mathbf{x}) R(\lambda, \mathbf{x}) \rho_c(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

где \mathbf{x} – пиксель изображения \mathbf{f} , $c \in \{R, G, B\}$ – цветовой канал, λ – длина волны в видимом спектре ω , $I(\lambda, \mathbf{x})$ – спектральное распределение освещения, $R(\lambda, \mathbf{x})$ – спектральная функция отражения поверхности, и $\rho_c(\lambda)$ – спектральная чувствительность камеры соответствующего канала c .

3.1 Grey-World

В работе в качестве базовых используются алгоритмы, основанные на статистиках низкого уровня. Наиболее известным и наиболее часто используемым методом такого типа является алгоритм Grey-World [20], в основе которого лежит следующее предположение: усредненный по полю зрения спектр сцены при нейтральном источнике света является ахроматическим. Из этого предположения напрямую следует, что любое отклонение от нейтральной цветности в сцене вызвано воздействием источника освещения. Это означает, что цвет источника освещения e может быть оценен путем вычисления среднего цвета на изображении:

$$\frac{1}{N} \sum_{\mathbf{x}} f_c(\mathbf{x}) = e_c, \quad (2)$$

где N - число пикселей изображения.

В качестве альтернативы, вместо вычисления среднего цвета всех пикселей, было показано, что сегментирование изображения и вычисление среднего цвета для всех сегментов может улучшить точность алгоритма Grey-World [21, 22]. Этот этап предобработки может привести к улучшению результатов, поскольку Grey-World чувствителен к большим равномерно окрашенным поверхностям, так как их наличие в сцене часто приводит к нарушению основного предположения. Сегментация изображения перед вычислением среднего цвета сцены уменьшает этот эффект.

3.2 White-Patch и Max-RGB

Другим хорошо известным методом является алгоритм White-Patch [23], работающий в следующем предположении: максимальный отклик соответствует наименее поглощающему красителю. Такая белая или зеркальная (под нужным углом) поверхность будет отражать весь спектр падающего на неё света. Следовательно, цвет этого идеального отражения в точности соответствует цвету источника света. На практике предположение об идеальном коэффициенте отражения применяется отдельно для каждого цветового канала, что приводит к алгоритму Max-RGB [24, 25]. Этот метод оценивает освещение путем вычисления максимального отклика в отдельных цветовых каналах:

$$\max_{\mathbf{x}} f_c(\mathbf{x}) = e_c. \quad (3)$$

В [26] показано, что алгоритмы Grey-World и Max-RGB являются частными случаями более общего представления, выразимого через норму Минковского:

$$\mathcal{L}_c(p) = \frac{1}{N} \sum_{\mathbf{x}} f_c^p(\mathbf{x}) \Big)^{\frac{1}{p}} = e_c, \quad (4)$$

Замена $p = 1$ в уравнении (4) эквивалентна вычислению среднего значения $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, то есть $\mathcal{L}(1) = (\mathcal{L}_R(1), \mathcal{L}_G(1), \mathcal{L}_B(1))^T$ равно ответу алгоритма Grey-World. Когда $p = \infty$, уравнение (4) приводит к вычислению максимума $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, т.е. $\mathcal{L}(\infty)$ равно ответу алгоритму Max-RGB.

3.3 Grey-Edge

Допущения вышеуказанных методов цветовой константности основаны на распределении цветов (значениях пикселей), представленных на изображении. Рассмотрение статистик более высокого порядка (таких как производные изображений) предложено в [27], где представлен алгоритм Grey-Edge, который включает в себя хорошо известные методы, такие как (4), а также методы, основанные на производных первого и второго порядка:

$$\frac{1}{N} \sum_{\mathbf{x}} \left| \frac{d^n f_c(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}^n} \right|^p \Big)^{\frac{1}{p}} = e_c^{n,p}, \quad (5)$$

где $|\cdot|$ обозначает норму Фробениуса, $c = \{R, G, B\}$, n - порядок производной, а p - норму Минковского.

Поскольку длина вектора \mathbf{e} зависит от геометрии сцены, а не от спектральных свойств источника освещения, этот вектор рассматривается в нормированном виде.

3.4 Оценка распределения классическими методами

Согласно работе [28], существует несколько способов адаптировать алгоритмы оценки доминантного источника освещения для получения множества оценок в сцене по одному изображению. В данной работе рассмотрено два способа: на основе сетки и на основе ключевых точек. В случае сегментации с помощью сетки изображение разделяется на 4374 одинаковые квадратные области размером 32×32 , к каждой из которых применяется соответствующий базовый алгоритм. Нахождение ключевых точек по изображению происходит с помощью детектора Харриса-Лапласа [29] со следующими параметрами: количество октав в масштабно-пространственной пирамиде - 8; пороговое значение для показателя угловатости Харриса - 0.01; пороговое значение для выбора разностной шкалы по Гауссу - 0.01; максимальное количество углов, которые необходимо учитывать - 500; количество промежуточных гамм на октаву - 2. Далее, с помощью полученных таким образом расположений и размеров ключевых точек, всё изображение разбивается на области с использованием $L2$ расстояния.

Оценка алгоритма для каждой полученной области соответствует точке из распределения на плоскости цветности.

3.5 Нейросетевое решение

Несмотря на то, что на первый взгляд разумной идеей кажется обучение нейросети для предсказания распределения освещения по исходному изображению, практика показала, что легковесную архитектуру таким образом создать не удаётся. Одним из способов решения данной задачи является использование тяжёлых сетей на основе AlexNet, аналогично работе [35], изменив процедуру финальной агрегации результата, смотри рисунок 6.

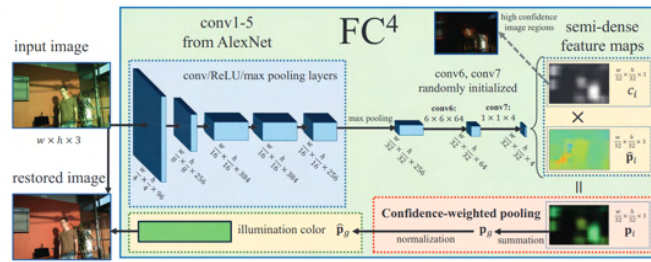


Рис. 6. Иллюстрация архитектуры FC4 для оценки одной точки белого в сцене.

Предварительные эксперименты с адаптацией данной архитектуры не показали достаточно хороших результатов, поэтому в данной работе не приводятся. Одной из основных причин сложности адаптации подобного решения для оценки распределения источников освещения является несовпадение семантического содержания входного изображения и предсказываемого. Конкретнее, координаты входного изображения характеризуют объекты в исходной сцене, а координаты предсказываемого распределения определяют параметры цветности различных источников освещения. Высказана гипотеза, что подобная рассогласованность входа и выхода не позволяет обучать свёрточные нейронные сети.

Для решения данной проблемы в работе предлагается другая постановка задачи: на вход нейросетевому алгоритму подаётся гистограмма цветности исходного изображения, а предсказать требуется по-прежнему параметры распределения. Для проверки возможности обучения нейросетевых алгоритмов в данной постановке было проведено два эксперимента. Эксперимент 1 состоял в обучении тривиальной нейронной сети, предсказывающей входное распределение изображения. Эксперимент 2 состоял в обучении легковесной свёрточной нейронной сети на вход которой подаётся гистограмма

цветностей изображения и требуется предсказать распределения параметров освещения. Для обоих экспериментов использовалась архитектура из 8 последовательных свёрточных слоев с функцией активации `relu` после каждого из них, смотри рисунок 7.

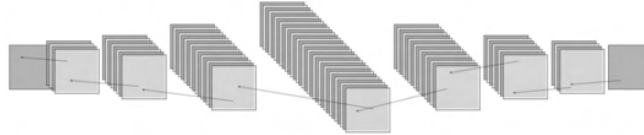


Рис. 7. Иллюстрация нейросетевой архитектуры, использованной в работе.

Для всех сверток применялось окно размера 3 и сохранялся размер изображения.

Обучение происходило на протяжении 1000 эпох с размером батча 8 на метрике `MSELoss`. Оптимизатором был выбран `Adam` с `learning rate = 1e-3`, `weight decay=1e-4`.

4 Экспериментальные результаты

4.1 Используемые метрики

Для оценки полученных результатов в работе использовались 2 метрики: угловая ошибка и метрика землекопа. Угловая ошибка [30] является самой популярной метрикой в задаче оценки освещения, так как она отражает отклонение цветов, как векторов, друг от друга, при этом не учитывая их абсолютных величины (яркости).

Однако такой способ расчета ошибки затруднителен в случае распределений, поэтому в работе предложено использование метрики землекопа. Метрика землекопа эффективно используется для нахождения расстояния между одномерными гистограммами [31], что вдохновило авторов для использования её аппроксимации в работе.

Аппроксимация считалась с помощью Быстрого преобразования Хафа [32]. Сначала для всех наклонов прямых считались суммы по прямым с соответствующим наклоном, таким образом формируя одномерную гистограмму. Далее между полученными парами гистограмм (`ground truth` и ответ алгоритма) считались одномерное расстояние землекопа с $L1$ метрикой за линейное время. После этого бралось среднее значение одномерных расстояний землекопа по всем наклонам кривых. Полученное число было названо аппроксимацией метрики землекопа. Таким образом асимптотическая вычислительная сложность расчета такой метрики составляла $\Theta(n^2 \log n)$.

Стоит отметить, что в выражении для метрики землекопа $L1$ расстояние между ячейками, использованное при подсчете кумулятивной суммы, можно заменить на угловую метрику или ошибку репродукции. Это позволит связать получаемые численные результаты в новой постановке с результатами в постановке предсказания одной белой точки.

4.2 Результаты глобальной оценки освещения

Ниже приведены результаты работы базовых алгоритмов, предсказывающих одну глобальную оценку освещения. Угловая ошибка считалась между оценкой освещения алгоритма и ответом для левой грани SpyderCube (левая грань выбрана без ограничения общности). Метрика землекопа считалась между распределением, состоящим из одной точки белого, полученной из работы базовых алгоритмов, и ground truth распределением. В таблицу 3 помимо ответов алгоритмов также добавлены результаты для левой грани SpyderCube.

Таблица 1. Угловая ошибка (левая грань) для сравнения работы базовых алгоритмов, предсказывающих одну глобальную оценку освещения.

Метод	Среднее	Медиана	10% худших	1% худших
Grey-World	3.49	2.65	10.38	16.42
Max-RGB	6.71	4.15	20.99	32.13
Grey-Edge	3.48	2.64	10.02	15.41

Таблица 2. Метрика землекопа, посчитанная между распределением, состоящим из одной точки белого, полученной из работы базовых алгоритмов, и ground truth распределением.

Метод	Среднее	Медиана	10% худших	1% худших
SpyderCube левая грань	13.02	12.86	17.29	21.55
Grey-World	14.94	14.04	22.60	28.84
Max-RGB	17.69	15.44	30.70	40.97
Grey-Edge	14.89	14.13	22.32	27.73

Результаты для угловой ошибки показывают, что качество алгоритмов Grey-World и Grey-Edge примерно одинаково на этой метрике, когда же алгоритм Max-RGB сильно уступает. Сравнение результатов алгоритмов на метрике землекопа приводит к таким же заключениям. Отсюда следует, что даже при использовании $L1$ при оценке расстояния землекопа количественное соотношение между точностями алгоритмов сохраняется. Это в том

числе косвенно подтверждает корректность предложенного способа оценки расстояния землекопа. Кроме того, результаты для левой грани SpyderCube логично лучше полученных для базовых алгоритмов, так как ответы для цветовой мишени являются частью исходной разметки данных.

4.3 Результаты оценки распределения освещения

Рассмотрим теперь точность оценки распределения параметров освещения на основе полученного набора данных. Ниже приведены результаты работы базовых алгоритмов с использованием сегментации на основе сетки или ключевых точек. Также приведен результат нейросетевого решения. Метрика землекопа считалась между распределением, полученным из работы базовых алгоритмов/нейронной сети, и ground truth распределением.

Таблица 3. Метрика землекопа, посчитанная между распределением, полученным из работы базовых алгоритмов/нейронной сети, и ground truth распределением.

Метод	Среднее	Медиана	10% худших	1% худших
Grey-World (сетка)	9.40	8.69	18.33	25.33
Max-RGB (сетка)	8.23	7.60	16.15	22.25
Grey-Edge (сетка)	9.31	8.46	18.20	24.91
Grey-World (ключевые точки)	9.45	8.55	18.67	24.86
Max-RGB (ключевые точки)	8.67	7.89	16.84	22.82
Grey-Edge (ключевые точки)	9.40	8.50	18.66	25.12
Нейросетевое решение	5.67	5.44	6.92	9.08

Результаты работы Max-RGB в условиях сегментации, напротив, лучше Grey-World и Grey-Edge как на основе сетки, так и на основе ключевых точек. Результаты работы нейросетевого решения превосходят все базовые алгоритмы.

Ниже, на рисунке 8, представлено сравнение ground truth распределения с распределениями, полученными с помощью нейросетевого решения, Max-RGB на сетке и Max-RGB на ключевых точках.

5 Заключение

В статье решается проблема несоответствия современных наборов данных задачам, возникающим при цветовой коррекции изображений. Предложен новый набор данных “изображение – распределение освещения в сцене”. С ним произведен ряд экспериментов с использованием алгоритмов, основанных на статистиках низкого уровня (Grey-World, Max-RGB, Grey-Edge). Работа алгоритмов проверена на двух метриках: угловой ошибке и метрике

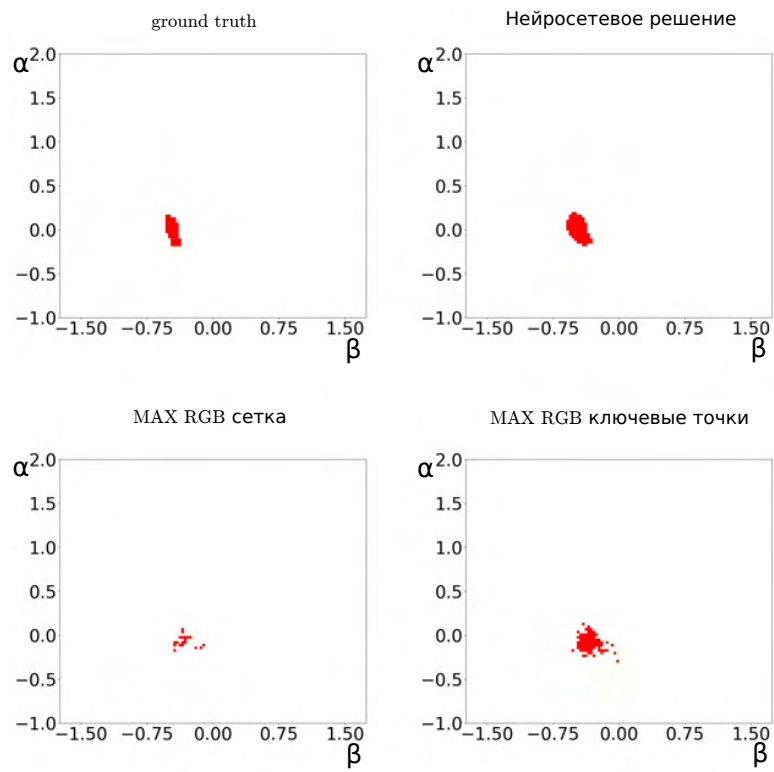


Рис. 8. Сравнение ground truth распределения с распределениями, полученными с помощью нейросетевого решения, Max-RGB на сетке и Max-RGB на ключевых точках.

землекопа для случая предсказания одной точки белого и распределения соответственно.

Собран новый набор данных для решения задачи оценки распределения освещения. Предложен новый способ оценки качества решения задачи оценки освещения с использованием аппроксимации метрики Васерштейна. Получены количественные оценки качества оценки распределения источников освещения с помощью адаптированных классических алгоритмов оценки освещения. Лучшее среднее значение метрики землекопа на базовых алгоритмах для глобальной оценки достигается для алгоритма Grey-Edge (14.89), а лучшее среднее значение метрики землекопа для случая сегментации достигается для алгоритма Max-RGB на основе сетки (8.23). Результат работы свёрточной нейронной сети превосходит все базовые алгоритмы (5.67).

Стоит выделить три направления для развития данной работы. Во-первых, целесообразно выполнить полноценное исследование по поиску нейросетевой архитектуры минимального размера, способных решать рассматриваемую задачу. На практике это свойство особенно важно для обеспечения режима реального времени в работе мобильных устройств. Также есть потенциал обучения на самой метрике землекопа, в том числе с защитой в нее угловой ошибкой. Во-вторых, провести исследование человеческих предпочтений, тем самым добавив бинарным ground truth распределениям веса, соответствующие предпочтениям пользователей. В-третьих, оценить применимость нового набора данных для аугментации данных в контексте оценки доминантного источника освещения.

Список литературы

1. Gijssenij A., Gevers T. Color constancy using natural image statistics. *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, 2007, pp. 1-8.
2. Karaimer H. C., Brown M. S. A software platform for manipulating the camera imaging pipeline. *European Conference on Computer Vision*. Cham: Springer, 2016, pp. 429-444.
3. Ciurea F., Funt B. A large image database for color constancy research. *Color and Imaging Conference*. Society for Imaging Science and Technology, 2003, vol. 2003, No. 1, pp. 160-164.
4. Gehler P. V. et al. Bayesian color constancy revisited. *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, 2008, pp. 1-8.
5. Cheng D., Prasad D. K., Brown M. S. Illuminant estimation for color constancy: why spatial-domain methods work and the role of the color distribution. *JOSA A*, 2014, vol. 31, No 5, pp. 1049-1058.
6. Laakom F. et al. Intel-tau: A color constancy dataset. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 39560-39567.
7. Ershov E. et al. The cube++ illumination estimation dataset. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 227511-227527.
8. Aghaei H., Funt B. A flying gray ball multi-illuminant image dataset for color research. *Color and Imaging Conference*. Society for Imaging Science and Technology, 2020, vol. 2020, No. 28, pp. 142-149.

9. Beigpour S. et al. Multi-illuminant estimation with conditional random fields. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, vol. 23, No. 1, pp. 83-96.
10. Bianco S., Schettini R. Adaptive color constancy using faces. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2014, vol. 36, No. 8, pp. 1505-1518.
11. Scuella M. et al. Museum lighting: optimizing the illuminant. *Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur*, 2004, vol. 29, No. 2, pp. 121-127.
12. Cheng D. et al. Two illuminant estimation and user correction preference. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 469-477.
13. Barron J. T., Tsai Y. T. Fast fourier color constancy. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 886-894.
14. Afifi M., Brown M. S. Sensor-independent illumination estimation for DNN models. *arXiv preprint arXiv:1912.06888*, pp. 2019.
15. Qian Y. et al. Recurrent color constancy. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2017, pp. 5458-5466.
16. Savchik A., Ershov E., Karpenko S. Color cerberus. *2019 11th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA)*. IEEE, 2019, pp. 355-359.
17. Aghaei H., Funt B. A flying gray ball multi-illuminant image dataset for color research. *Color and Imaging Conference*. Society for Imaging Science and Technology, 2020, vol. 2020, No 28, pp. 142-149.
18. Dabov K. et al. BM3D image denoising with shape-adaptive principal component analysis. *SPARS'09-Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations*. 2009.
19. Николаев Д. П. *Алгоритмы цветовой сегментации, применимые в условиях сложного освещения сцены*. Автореферат кандидатской диссертации : Моск. гос. ун-т им. МВ Ломоносова, 2004.
20. Buchsbaum G. A spatial processor model for object colour perception. *Journal of the Franklin institute*, 1980, vol. 310, No. 1, pp. 1-26.
21. Gershon R., Jepson A. D., Tsotsos J. K. From [R, G, B] to Surface Reflectance: Computing Color Constant Descriptors in Images. *IJCAI*, 1987, pp. 755-758.
22. Barnard K., Cardei V., Funt B. A comparison of computational color constancy algorithms. I: Methodology and experiments with synthesized data. *IEEE transactions on Image Processing*, 2002, vol. 11, No. 9, pp. 972-984.
23. Land E. H. The retinex theory of color vision. *Scientific american*, 1977, vol. 237, No. 6, pp. 108-129.
24. Funt B., Shi L. The rehabilitation of MaxRGB. *Color and imaging conference*. Society for Imaging Science and Technology, 2010, vol. 2010, No. 1, pp. 256-259.
25. Funt B., Shi L. The effect of exposure on MaxRGB color constancy. *Human Vision and Electronic Imaging XV*. SPIE, 2010, vol. 7527, pp. 282-288.
26. Finlayson G. D., Trezzi E. Shades of gray and colour constancy. *Color and Imaging Conference*. Society for Imaging Science and Technology, 2004, vol. 2004, No. 1, pp. 37-41.
27. Van De Weijer J., Gevers T., Gijsenij A. Edge-based color constancy. *IEEE Transactions on image processing*, 2007, vol. 16, No. 9, pp. 2207-2214.

28. Gijssenij A., Gevers T. Color constancy using natural image statistics and scene semantics. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, vol. 33, No. 4, pp. 687-698.
29. Mikolajczyk K., Schmid C. Scale & affine invariant interest point detectors. *International journal of computer vision*, 2004, vol. 60, No. 1, pp. 63-86.
30. Hordley S. D., Finlayson G. D. Reevaluation of color constancy algorithm performance. *JOSA A*, 2006, vol. 23, No. 5, pp. 1008-1020.
31. Rubner Y., Tomasi C., Guibas L. J. The earth mover's distance as a metric for image retrieval. *International journal of computer vision*, 2000, vol. 40, No. 2, pp. 99-121.
32. Ershov E. et al. Fast Hough transform analysis: pattern deviation from line segment. *Eighth International Conference on Machine Vision (ICMV 2015)*. SPIE, 2015, vol. 9875, pp. 42-46.
33. Banić N., Košćević K., Lončarić S. Unsupervised learning for color constancy. *arXiv preprint arXiv:1712.00436*, 2017.
34. Nikolaev D. P., Nikolayev P. P. Linear color segmentation and its implementation. *Computer Vision and Image Understanding*, 2004, vol. 94, No. 1-3, pp. 115-139.
35. Hu Y., Wang B., Lin S. Fc4: Fully convolutional color constancy with confidence-weighted pooling. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 4085-4094.
36. Ershov E. et al. NTIRE 2022 challenge on night photography rendering. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2022, pp. 1287-1300.
37. Graham R. L. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set. *Info. Pro. Lett.*, 1972, vol. 1, pp. 132-133.
38. Grassman H. Zur Theorie der Farbenmischung. Poggendorf. *Ann. Phys.*, 1953, vol. 89, No. 69, pp. 1853.

Распознавание индивидуальных митохондрий и анализ их характеристик с помощью методов компьютерного зрения

Макиевская К.И.¹, Попков В.А.², Андрианова Н.В.², Плотников Е.Ю.²

¹ Факультет биоинженерии и биоинформатики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² НИИ физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
makievskaya.ciara@gmail.com

Аннотация. Характеристики индивидуальных митохондрий в клетке, такие как размер, форма, значение трансмембранного потенциала, реакция на повреждающее воздействие, могут отличаться даже в пределах одной клетки. При повреждающих воздействиях ключевую роль в выживании клеток играет соотношение в популяции митохондрий органелл, устойчивых к повреждению и нет. Для такого популяционного анализа необходимо анализировать характеристики индивидуальных митохондрий, что крайне трудоемко. В данной работе нами был разработан подход для анализа индивидуальных митохондрий с помощью конфокальной микроскопии и машинного обучения.

Ключевые слова: Митохондрии, Машинное обучение, Компьютерное зрение.

1 Введение

Митохондриальные фенотипы могут значительно различаться в разных типах клеток и при разных физиологических состояниях в одной клетке. Слияние и деление митохондрий обычно приводит либо к их фрагментированию (тогда митохондрии в основном представлены в виде небольших отдельных органелл), либо к образованию гиперслитой сети с удлинненными и связанными между собой митохондриями. Эти сбалансированные динамические переходы необходимы для обеспечения нормальной митохондриальной функции и для быстрой адаптации митохондриальной сети в соответствии с метаболическим состоянием клетки [1-2].

Разные морфологические состояния митохондрий связаны с множественными физиологическими и патофизиологическими процессами [3]. Например, усиленная митохондриальная фрагментация часто ассоциирована с митохондриальной дисфункцией, поскольку это морфологическое состояние преобладает при повышенных уровнях стресса и гибели клеток.

При повреждающих воздействиях, например, при окислительном стрессе, возможно развитие патологических состояний по следующему сценарию:

стрессовое воздействие приводит к повреждению единичных, самых неустойчивых митохондрий. Их повреждение, в свою очередь, приводит к вторичной генерации активных форм кислорода (АФК), которые повреждают соседние органеллы. Этот лавинообразный процесс распространяется по всей митохондриальной сети клетки, в результате чего накапливаются митохондриальные АФК и происходит окислительное повреждение митохондриальной ДНК или белков, и в конечном итоге клетка погибает. Погибшие клетки высвобождают в ткань повреждающие факторы, что может приводить к повреждению соседних клеток и, как следствие, ткани и органа в целом [4].

Таким образом, в случае повреждения митохондрий важную роль в определении судьбы клетки и развития ряда патологий могут играть индивидуальные митохондрии. В таком случае анализ морфологии, состояния митохондрий и динамики их слияния и деления крайне важен для исследования механизмов развития патологий, а также для оценки эффективности терапевтических подходов.

Наиболее информативны для анализа митохондрий данные, полученные с помощью конфокальной микроскопии, однако для анализа индивидуальных митохондрий в клеточной культуре даже в очень простом эксперименте необходимо вручную проанализировать параметры свыше нескольких десятков тысяч митохондрий, что займет сотни часов работы. При усложнении эксперимента трудоемкость анализа несоизмеримо возрастает. Существует широкий спектр автоматизированных подходов для анализа изображений, включающих как очень простые классические алгоритмы, так и алгоритмы машинного и глубокого обучения. По общемировому опыту, простые методы недостаточно хорошо работают для изучения тонких механизмов внутриклеточных процессов. Поэтому сейчас в мире активно разрабатываются подходы, связанные с машинным обучением, однако все они требуют тонкой со-настройки машинного обучения и дизайна лабораторного эксперимента [5].

Таким образом, целью нашей работы послужила разработка подходов компьютерного зрения, основанных на конфокальной микроскопии и позволяющих анализировать большие выборки индивидуальных митохондрий.

2 Промежуточные результаты

Наши промежуточные результаты заключаются в формировании и реализации протокола для потокового анализа индивидуальных митохондрий, начиная со съемки клеток с помощью конфокального микроскопа, заканчивая написанием программ для анализа полученных изображений с использованием машинного обучения.

В данной работе использовалась клеточная линия MDCK (Madin-Darby Canine Kidney, иммортализованная эпителиальная клеточная культура, полученная из нормальной ткани почек взрослой самки кокер-спаниеля). Для анализа особенностей индивидуальных митохондрий были получены видеозаписи в режиме супер-разрешения Airyscan с конфокального микроскопа LSM 900 (Carl

Zeiss, Германия). Для съемки использовался объектив с 63-кратным увеличением. Предварительно клетки окрашивали этиловым эфиром тетраметилродамина (TMRE) и MitoTracker Green. В рамках данной работы анализировался первый кадр каждой полученной видеозаписи (см. Рис. 1; 4А).

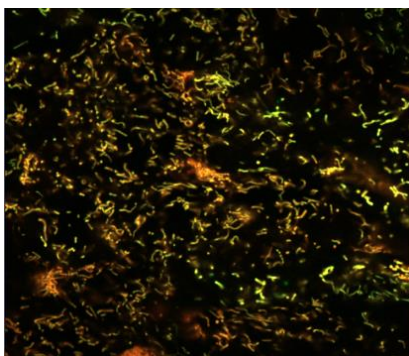


Рис. 1. Пример сырого изображения, используемого впоследствии для анализа индивидуальных митохондрий. Изображение получено путем слияния зеленого и красного каналов.

Для обучения модели XGBoost были выделены признаки, полученные с помощью адаптивного выравнивания гистограммы с ограничением контраста (CLAHE) и ряда фильтров выделения границ, в частности операторов Кэнни, Собеля, Робертса, Шарра, Прюитта, фильтра Гаусса, медианного фильтра и в общей сложности 64 фильтров Габора. Таким образом были получены изображения, у которых каждый пиксель был размечен моделью (см. Рис. 2; 4Б).

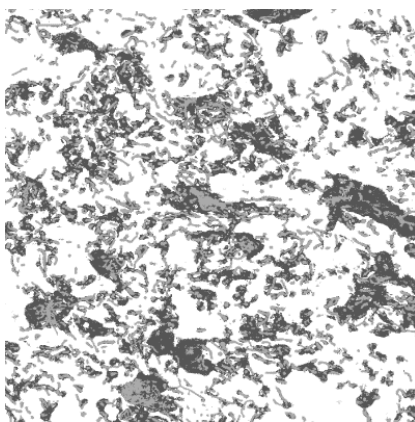


Рис. 2. Пример изображения, размеченного предварительно обученной моделью XGBoost.

Впоследствии митохондрии сегментировались с помощью алгоритма Watershed. В результате были получены изображения с сегментированными митохондриями (см. Рис. 3; 4В), параметры которых далее обчислялись с помощью пакета sci-kit image, реализованного на python.

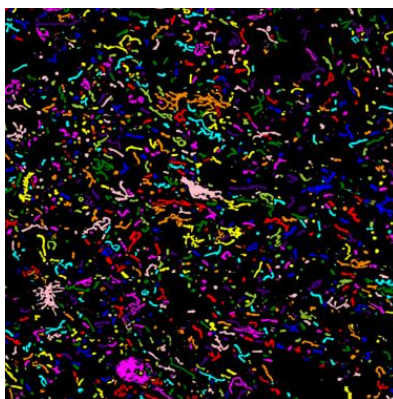


Рис. 3. Пример изображения, на котором индивидуальные митохондрии сегментированы с помощью алгоритма Watershed.

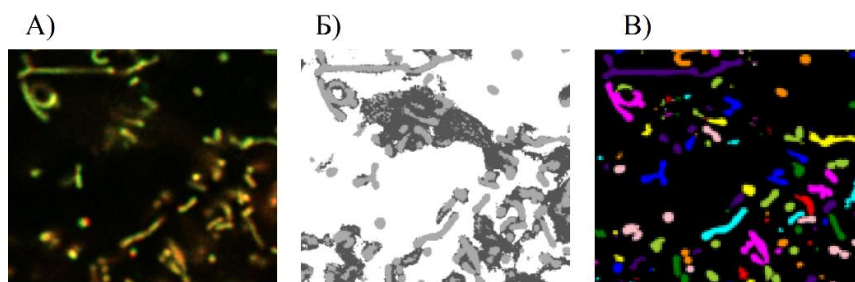


Рис. 4. Пример увеличенного фрагмента изображения, на котором продемонстрированы этапы обработки изображений: А) Сырое изображение, полученное с конфокального микроскопа; Б) Изображение, размеченное обученной моделью XGBoost; В) Изображение, на котором митохондрии сегментированы с помощью алгоритма Watershed.

Теоретически с помощью алгоритма Watershed возможно проводить 3D-сегментацию и, таким образом, анализировать поведение митохондрий в динамике на видеозаписях, однако сейчас данная часть разрабатываемого нами подхода находится в процессе реализации.

В будущем наш подход позволит производить скрининг веществ, обладающих интересующими эффектами на индивидуальные митохондрии.

Данное исследование поддержано грантом РНФ (#21-75-30009).

Литература

1. van der Blik AM, Shen Q, Kawajiri S. Mechanisms of mitochondrial fission and fusion. *Cold Spring Harb Perspect Biol.* 2013;5. doi:10.1101/cshperspect.a011072
2. Wai T, Langer T. Mitochondrial Dynamics and Metabolic Regulation. *Trends Endocrinol Metab.* 2016;27: 105–117.
3. Nunnari J, Suomalainen A. Mitochondria: in sickness and in health. *Cell.* 2012;148: 1145–1159.
4. Niemann B, Schwarzer M, Rohrbach S. Heart and Mitochondria: Pathophysiology and Implications for Cardiac Surgeons. *Thorac Cardiovasc Surg.* 2018;66: 11–19.
5. Lefebvre AEYT, Ma D, Kessenbrock K, Lawson DA, Digman MA. Automated segmentation and tracking of mitochondria in live-cell time-lapse images. *Nat Methods.* 2021;18: 1091–1102.

Predicting a Next Activity in Event Logs: an Approach based on LSTMs and Gradient Boosting

Maksim Karpov¹[0000-0003-4503-2682], Sergey Petrovich¹[0000-0001-7664-0619],
Artem Streltsov¹[0000-0001-7889-1630], and Andrey
Ustyuzhanin¹[0000-0001-7865-2357]

Faculty of Computer Science, HSE University, Moscow, Russia
{mekarpov, austyuzhanin}@hse.ru, {adstreltsov, sdpetrovich}@edu.hse.ru

Abstract. Predictive process monitoring (PPM) is considered one of the main domains in log analysis along with process mining. Still, it refers to observing future process behaviour, e.g., next activity prediction problem. PPM helps to detect errors in processes in time and prevent critical situations, significantly reducing company expenses and system failures. In all previous research, basic approaches to applying recurrent neural networks were mainly used. In this paper, we explore existing neural network approaches to sequence analysis and apply the best solutions for next activity prediction in an event log. However, neural networks may not always show the best results, so we compare deep learning solutions with gradient boosting models. In addition, we introduce an efficient way of vector representations and advanced methods of feature engineering for logs.

Keywords: Predictive process monitoring · Deep neural networks · Long short term memory · Gradient boosting · Feature engineering

1 Introduction

Nowadays, more and more attention in industry and research is paid to data-driven approaches in decision-making. One such field that helps to extract knowledge from data and apply predictive analytics in business process management systems is predictive process monitoring (PPM).

With the development of data science, companies are increasingly trying to replace "gut feeling" with data-driven results, and with the improvement of data analysis, automated methods are increasingly expanding the understanding of modern business. PPM is one of these tools for data-based analysis. Since nowadays there is a large availability of data logged by information systems supporting the day-to-day operations of companies, and mature and fast approaches are rapidly growing in PPM, these opportunities are becoming more and more practical.

Its instruments may help to predict process behaviour and to identify and address performance and compliance problems. Usually event logs (computer-generated records) are represented as a pair of an activity label and an activity timestamp, and it is crucial for developers or business-owners to understand which event is most likely to happen given the previous event sequence. This may help drastically to reduce costs and find bottlenecks in company processes.

That is why one of the most widespread domain in log analysis is PPM. The most significant tasks are:

- Next activity prediction. In this case the problem is quite similar to multi-class classification, but however the model should pay attention to logs particularities, such as time elapsed between events and their order.
- Next activity timestamp prediction. This task especially needs the application of time-aware models, e. g., LSTMs.
- Remaining cycle time and others. In this research we focus exclusively on next activity prediction task.

Referring to [1] and described more formally, an event log is a sequence of events with time delta between them. Every event log contains at least an activity name, a case id (a particular execution of a process instance) and a timestamp (i.e. time of event occurrence), that can be informative in case of log analysis, and an activity label. Moreover, some events entail other ones, so overall they form a structure where events happen in order, which is also an important feature.

Definition 1 (Event, Trace, Event Log). *An event is a tuple (c, a, ts) where c is the case id, a is the activity (event type) and ts is the timestamp. A trace is a non-empty sequence $\sigma = \langle e_1, \dots, e_{|\sigma|} \rangle$ of events such that $\forall i, j \in 1, \dots, |\sigma|$ $e_i.c = e_j.c$ and $e_i.ts \leq e_j.ts$, for $1 \leq i < j \leq |\sigma|$. An event log \mathcal{L} is a set $\sigma_1, \dots, \sigma_{|\mathcal{L}|}$ of traces. A trace can also be considered as a sequence of vectors, in which a vector contains all or a part of the information relating to an event, e.g. an event's activity. Formally, $\sigma = \langle x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(t)} \rangle$, where $x_{(i)} \in R^{n \times 1}$ is a vector, and the superscript indicates the time-order upon which the events happened, n is the number of features derived for each event.*

As previously mentioned, PPM as a domain of log analysis is aimed for some process predictions (e.g. next event prediction). In that way, the main goal is the most precise forecast of future events and its occurrence timestamps.

An event description is a string that contains at least a timestamp and a label. A very similar area of machine learning is natural language processing (NLP), where models learn to analyse human language, which is represented as a sequence of words or letters. The main difference of PPM from any other NLP task is the fact that an individual event can be treated as a separate word in a whole sentence (log), hence it needs a more thorough approach to events preprocessing and embedding.

Definition 2 (Prefix and label). *Given a trace $\sigma = \langle e_1, \dots, e_k, \dots, e_{|\sigma|} \rangle$, a prefix of length k , that is a non-empty sequence, is defined as $f_p^{(k)}(\sigma) =$*

$\langle e_1, \dots, e_k \rangle$, with $0 < k < |\sigma_c|$ and a label (i.e. next activity) for a prefix of length k is defined as $f_{l,ts}^{(k)}(\sigma) = \langle e_{k+1} \rangle$. This can be generalized for an input trace representing a sequence of vectors. For example, the tuple of all possible prefixes and the tuple of all possible labels for $\sigma = \langle x_{(1)}, x_{(2)}, x_{(3)} \rangle$ are $\langle \langle x_{(1)} \rangle, \langle x_{(1)}, x_{(2)} \rangle \rangle$ and $\langle x_{(2)}, x_{(3)} \rangle$.

In this way, formally, the next activity prediction problem can be reformulated as predicting the event vector by the given non-empty prefix of the trace. Having an opportunity to predict the next activity, large companies in the industry are able to detect anomalies in their processes in real time. In addition, if companies can model processes in such a way, they can find the patterns and shortcomings of the current workflow organization and quickly eliminate or update them.

2 Related work

In the past, predictive business process monitoring approaches rarely took advantage of deep learning. However, some deep neural networks (DNN) architectures, such as RNNs and LSTMs, can be applied relatively straightforwardly since logs of software companies, banks and other institutions can be presented as a sequence of events. Nonetheless, in recent years several attempts were made to leverage these models in PPM.

In [10] there is proposed LSTM-based DNN architecture to predict the completion time of running process. The authors converted activity attributes using one-hot encoding and considered additional real-valued or categorical context attributes.

[14] mostly concentrated on explainability rather than on predictive quality. In their attempt to predict the next activity label they used Bi-LSTM and layer-wise relevance propagation (LRP) to assign a relevance value to each event to estimate its contribution to the answer.

DNN architecture by [13] is based on LSTM cells and is used for next activity and timestamp prediction. They proposed a multitask learning approach and like in LSTM networks for data-aware remaining time prediction of business process instance they used one-hot encoding for activity label. Nevertheless, the authors did not take into consideration any additional data attributes.

[6] introduced approaches for learning low dimensional representations of activities, traces, logs and models. They used methods similar to those proposed by [9].

[11] introduced another DNN architecture based on LSTM. They integrate the elapsed time between consecutive events to adjust the cell memory to predict the next activity label and its timestamp.

Models such as Generative Adversarial Nets (GAN) have been gaining popularity in recent years and have also found application in PPM. In works by [17] the authors went further and predict the rest of the sequence by the given trace prefix. Thus, they solve sequence-to-sequence task and use GAN with LSTM encoder-decoder architecture.

Despite the popularity of deep learning, some methods of classical machine learning can compete with neural networks in quality. [3] proposed a solution based on gradient boosting algorithm. In their work they used XGBoost for PPM tasks.

We propose a modified approach for next activity prediction, using embedding techniques, custom loss functions and different recurrent neural networks, along with applying another gradient boosting method.

3 Activity prediction framework

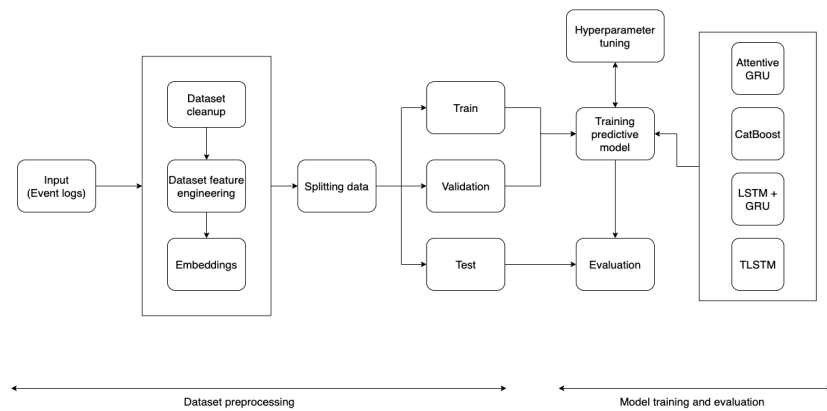


Fig. 1. Predictive framework.

3.1 Dataset preprocessing

It is crucial to apply some embeddings from NLP tasks to represent an event as a numeric vector, as only this data format is supported by predictive models:

- [9] proposed a Word2Vec embedding. Based on this work, [6] introduced an approach for embedding actions, traces, whole logs and models.
- Nevertheless, sometimes we need to encode not only an action, but a whole trace, similar to Doc2Vec, proposed by [7]. For that case [6] introduced a Trace2Vec architecture.
- However, it is worth experimenting with other embedding models, e.g. [12]. Based on co-occurrence probabilities, that approach might be also helpful while finding a proper action representation.

The problem of embedding an activity itself is obvious: training only the event identifier as a word, we lose information about time when the certain event happened.

Hence we need an approach to embed not only the raw activity, but also consider in context that the same event can occur at different times.

We propose an approach to binarize the timestamp into categories depending on time of the day (e.g "noon", "night", "evening") as concatenating to the event identifier and compare results with "raw" activity embedding. This way we enlarge the activity "corpus" and suppose it could make the activity embeddings more informative.

Further, it is reasonable to embed not only each activity separately, but also represent the whole trace or a sub-trace as a numeric vector, using, for example, Doc2Vec by [7]. However, embedding the whole trace may lead to target leakage. Therefore it becomes crucial to embed not the whole trace but its prefix: for each activity we represent the sub-trace from the start to the current event.

Data cleanup. Another important part of dataset preprocessing is its cleanup from outliers.

As the problem is not stated as anomaly detection, we consider excluding some activities like in [13] and [11]. We propose to drop such traces that contain "rare activities".

We consider an event rare if it occurs less than one percent across the entire log.

For Helpdesk, we drop some additional traces, that do not contain certain activities, that are supposed to be important and to be present in each non-outlying case.

Using timestamp. We propose to add some features based on the timestamp to make the model better comprehend the business process model.

- Time of day. In business process models, it is important to take into account what time of day an event occurs. This is important to understand, since many events occur during or outside the working day. We binarize timestamp into six possible variants of time of day:
 - Late Night
 - Morning
 - Evening
 - Early Morning
 - Noon
 - Night
- Timestamp split. We split timestamp into hour, day of week, month and year. And further, each of those features is encoded with One-Hot to make the model select weights for each entity value separately.
- Previous activity. For each event we keep the one that occurred in previous step.
- Timestamp deltas. The timestamp itself is not so informative, thus we consider using deltas between events instead.

- 1 With previous activity in the case.
- 2 With the first activity in the case. That helps to estimate the overall duration of the case.
- "Extended activity". We concatenate activity and the time of the day and encode such new activity with One-Hot.
- Ratio between the activity number in the case (after sorting the case log by timestamp) and the average case log length. According to [13] and [11], they use activity number in case as a feature. However, it is worth taking into account the average length of cases to estimate how long the trace continues relative to the other traces present in the event log.

Final datasets and their descriptions are presented in the Table 1.

Table 1. Embedding datasets description

Slug	Description
more_categorical	Used more categorical features (hour, day, month, etc...). Used as a base for other variants.
glove_raw	Using glove as embeddings for activity
glove_extended	Glove to embed activities + Doc2Vec to embed sub-traces
no_drop_cases	Do not drop cases with rare activities
raw_activity	Use embedding only on activity, do not append part of day
trace2vec	Word2Vec + Doc2Vec

3.2 Predictive model

One of the key aspects of the whole model is its architecture. As mentioned above, previously the problem of next activity prediction was solved by a statistical model or classical machine learning approaches. In this paper we try some neural network architectures.

Since the input data for model is presented in the form of sequences, it seems appropriate to use tools from related fields for sequence analysis. Nowadays the most popular area in sequence processing is NLP. Traditionally, NLP problems are solved using RNN models, especially "vanilla" LSTM and GRU cells. In this way, the main direction of this research is the implementation of different recurrent neural network architectures and the development of its various combinations that have not been used before in PPM tasks.

Focal loss. In this paper we chose to train our next activity prediction deep learning models using **Focal loss**, which was developed by [19]. Common methods to learn classification neural networks use standard cross-entropy loss (CE):

$$CE(p_t) = -\log p_t \quad (1)$$

where p_t is the predicted probability of the true label for t -th sample of training dataset. However, this loss function faces several problems when dealing with unbalanced datasets. This is due to the fact that it may be more profitable and easier for the model to increase the probability on already well-predicted major class samples than to try to better the learning probabilities for minor classes. This leads to an unsatisfactory quality of the model on the whole dataset. In tasks of PPM datasets are often unbalanced.

The idea of **Focal loss** is to add extra factor $(1 - p_t)^\gamma$, that is why this loss is defined as:

$$FL(p_t) = -(1 - p_t)^\gamma \log p_t \quad (2)$$

where $\gamma \geq 0$ is a scalar hyperparameter. The authors highlight two properties of the focal loss. First, when an example is misclassified and p_t is small, the modulating factor is near 1 and the loss is unaffected. As $p_t \rightarrow 1$, the factor goes to 0 and the loss for well-classified examples is down-weighted. Second, the focusing parameter γ smoothly adjusts the rate at which easy examples are down-weighted. When $\gamma = 0$, FL is equivalent to CE, and as γ is increased the effect of the modulating factor is likewise increased.

LSTM and GRU. The first model to solve the next activity prediction problem consists of RNN neural networks, specifically LSTM and GRU. The model consists of two parallel neural networks: GRU-network and LSTM-network. At each step they concatenate hidden states and pass the resulting vector through several fully connected layers. Final predictions are obtained using a softmax function. This architecture looks quite promising for the baseline, as it allows the LSTM network and the GRU network to complement each other. It is supposed to have a significant advantage over models that use only one type of network.

Exponential T-LSTM. Another approach is the T-LSTM model by [11]. As was mentioned before, the key idea of T-LSTM is that the importance of the previous event in next activity prediction decreases with the growth of the elapsed time. Thus, to take into account the influence of time, the authors add an additional multiplier in the LSTM cell, which is computed by some decay function. In the original paper they use the logarithmic function:

$$decay(x) = \frac{1}{\log(x + e)} \quad (3)$$

In our research we introduced **Pytorch** implementation of T-LSTM model with exponential decay function, which improved target test scores:

$$decay(x) = \exp(-\alpha \cdot x) \quad (4)$$

It is also worth noting, that the proposed function has an additional scalar parameter α . Varying this parameter gives additional flexibility in optimization,

so this alpha parameter was also involved in the process of hyperparameter tuning.

Attentive GRU. Despite widespread classical solutions for sequence analysis, it seems promising to use more advanced and modern techniques. For instance, it may be effective to implement an attention mechanism. This can solve the main problem of recurrent neural networks - vanishing gradient problem. It should also be noted that LSTM and GRU networks partially cope with that problem, but instead they cannot take into account parts of the sequence which are quite far from each other because the information carried by the earlier parts of the sequence is forgotten. Traces in event logs are normally long, that is why LSTM or GRU networks may not work accurate in these cases.

The last model is inspired by [5]. Our model has the same architecture, but the GRU cell replaces LSTM.

CatBoost. CatBoost¹ is a machine learning algorithm that uses gradient boosting on decision trees. It is available as an open source library, developed by the Russian software company Yandex. Nowadays, it is considered one of the most powerful gradient boosting algorithms. Therefore, it is promising to try this model in PPM task.

The main problem that occurs is that gradient boosting is an algorithm of classical machine learning, so it requires tabular data. It means that every data object must be represented as a vector of fixed dimension. In this paper, as such a vector representation, we used the concatenation of the embeddings of an event feature representation and its next activity as a target. The problem of not choosing a method of a sliding window is a fact that datasets may have traces of size 2, and the constraint of fixed dimension forces us to take the minimum of lengths.

In this paper, we use fine-tuned CatBoost along with different log embeddings as our approach to solve PPM problem.

4 Evaluation

4.1 Datasets

Most of the previous works apply developed methods to two main publicly available datasets: **Helpdesk**² and **BPI12W**³.

- **Helpdesk** dataset is event log concerning the ticketing management process of the Helpdesk of an Italian software company.
- **BPI12W** dataset is event log of a loan application process of a large German financial institution.

¹ <https://catboost.ai>

² <https://doi.org/10.4121/uuid:0c60edf1-6f83-4e75-9367-4c63b3e9d5bb>

³ <https://doi.org/10.4121/uuid:3926db30-f712-4394-aebc-75976070e91f>

Despite the prevalence of these datasets, they are quite trivial and far from real life. There are less than 10 different activities in each dataset, which makes traces too short. Therefore it does not allow any model to fully identify underlying patterns in the data. Nevertheless, many earlier authors measured their results using **Helpdesk** and **BPI12W**, so we are forced to use it for testing in order to be able to compare the quality.

Nevertheless, the latest research has moved away from the classic **Helpdesk** and **BPI12W**. In recent works the quality of proposed methods are estimated using more complex and modern **BPI12**⁴ and **BPI17**⁵ datasets.

These two datasets are newer versions of **BPI** datasets. There are about 30 different activities with very unbalanced distribution. The size of the datasets is much larger, which is an important aspect for training deep neural networks and the average length of traces is significantly longer, especially in **BPI17**. This makes data more realistic.

4.2 Experimental results

In this section we are going to compare the results of the previously described models.

Table 2. Test results comparison for T-LSTM models with different decay functions.

Original TLSTM test results				
Dataset	Helpdesk	BPI12W	BPI12	BPI17
Accuracy	0.724	0.778	-	-
Exponential TLSTM test results				
Dataset	Helpdesk	BPI12W	BPI12	BPI17
Accuracy	0.775	0.787	0.849	0.879

In Table 2 there are represented the results of time-aware LSTMs for next activity prediction. A small change of the decay function led to a significant improvement in quality.

Regarding the attention models, this architecture did not produce any strong quality boost either LSTM-based and GRU-based. The results are shown in Table 3. This situation can be explained by the assumption that in the explored datasets the next event depends only on several previous ones, so it is impractical to take into account the entire prefix as we do in attention mechanism.

The best quality was achieved using various types and modifications of recurrent neural networks, specifically LSTM + GRU model. This architecture is enough complex to be able to extract underlying patterns in the data. Thus, this model was mainly used when testing our own embeddings and new features. The achieved results are represented in Table 4.

⁴ <https://doi.org/10.4121/uuid:3926db30-f712-4394-aebc-75976070e91f>

⁵ <https://doi.org/10.4121/uuid:0c60edf1-6f83-4e75-9367-4c63b3e9d5bb>

Table 3. Test results comparison for different recurrent neural networks with attention layer.

Original LSTM with attention test results				
Dataset	Helpdesk	BPI12W	BPI12	BPI17
Accuracy	0.833	0.723	0.816	-
GRU with attention test results				
Dataset	Helpdesk	BPI12W	BPI12	BPI17
Accuracy	0.735	0.773	0.849	0.878

Source code is available at our GitHub repository⁶.

Table 4. Test accuracy with standard deviation for neural network model using different embedding techniques.

Embeddings type	Helpdesk	BPI12W	BPI12	BPI17
pure_traces	0.747 ± 0.004	0.774 ± 0.004	0.840 ± 0.010	0.874 ± 0.001
glove_extended	0.833 ± 0.005	0.788 ± 0.003	0.844 ± 0.009	0.892 ± 0.009
glove_raw	0.844 ± 0.001	0.781 ± 0.014	0.844 ± 0.005	0.903 ± 0.001
more_categorical	0.846 ± 0.001	0.773 ± 0.013	0.853 ± 0.001	0.901 ± 0.001
no_drop_cases	-	-	0.843 ± 0.002	0.873 ± 0.006
raw_activity	0.846 ± 0.001	0.796 ± 0.003	0.854 ± 0.002	0.894 ± 0.006
trace2vec	0.844 ± 0.001	0.779 ± 0.011	0.853 ± 0.004	0.887 ± 0.002

In this paper we also used a gradient boosting model for activity prediction. Unexpectedly, the CatBoost model showed the best quality for three out of the four datasets and surpassed deep learning approaches. This, in turn, confirms the hypothesis that the last few events have the greatest influence in the presented log datasets.

Table 5. Test accuracy for CatBoost model using different embedding techniques.

Embeddings type	Helpdesk	BPI12W	BPI12	BPI17
pure_traces	-	-	-	-
glove_extended	0.866	0.8	0.863	0.85
glove_raw	0.868	0.8	0.864	0.86
more_categorical	0.868	0.8	0.86	0.846
no_drop_cases	-	0.8	0.85	0.855
raw_activity	0.866	0.8	0.865	-
trace2vec	0.868	0.8	0.864	0.849

⁶ <https://github.com/serp404/ML4PPM>

5 Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90136. The reported study was funded by RFBR, project number 20-37-90136.

6 Conclusion

In this paper we propose an approach to predict next activity label given a trace prefix. The approach consists of several log embedding techniques, using modified predictive models, including different RNN variations and gradient boosting. Our results show that applying deep learning approaches along with hyperparameters tuning and embeddings lead to higher accuracy even on complex datasets compared to baseline methods. Finally, we reach better quality on some event logs using CatBoost as a predictive model, having lower training complexity.

As for future work, we will investigate the applicability of our approaches for other PPM tasks. Especially we are going to experiment with next timestamp prediction task.

References

1. Wil van der Aalst. 2016. Process Mining. Data Science in Action. DOI [10.1007/978-3-662-49851-4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49851-4)
2. Chiara Di Francescomarino, Chiara Ghidini, Fabrizio Maria Maggi, Fredrik Milani. 2018. Predictive Process Monitoring Methods: Which One Suits Me Best? [arXiv:1804.02422](https://arxiv.org/abs/1804.02422) [cs.AI]
3. Irene Teinemaa, Marlon Dumas, Marcello La Rosa, Fabrizio Maria Maggi. 2018. Outcome-Oriented Predictive Process Monitoring: Review and Benchmark [arXiv:1707.06766](https://arxiv.org/abs/1707.06766) [cs.AI]
4. Stefan Falkner, Aaron Klein, Frank Hutter. 2018. BOHB: Robust and Efficient Hyperparameter Optimization at Scale. ICML2018. [arXiv:1807.01774](https://arxiv.org/abs/1807.01774) [cs.LG]
5. Abdulrahman Jalayer, Mohsen Kahani, Amin Beheshti, Asef Pourmasoumi and Hamid Reza Motahari-Nezhad. 2020. Attention Mechanism in Predictive Business Process Monitoring. IEEE 24th International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC), Eindhoven, Netherlands, 2020, pp. 181-186. DOI: [10.1109/EDOC49727.2020.00030](https://doi.org/10.1109/EDOC49727.2020.00030)
6. Pieter De Koninck, Seppe vanden Broucke, Jochen De Weerd. 2018. Act2vec, trace2vec, log2vec, and model2vec: Representation Learning for Business Processes. Lecture Notes in Computer Science (LNCS, volume 11080). DOI [10.1007/978-3-319-98648-7_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98648-7_18)
7. Quoc V. Le, Tomas Mikolov. 2014. Distributed Representations of Sentences and Documents. [arXiv:1405.4053](https://arxiv.org/abs/1405.4053) [cs.CL]
8. Lisha Li, Kevin Jamieson, Giulia DeSalvo, Afshin Rostamizadeh, Ameet Talwalkar. 2016. Hyperband: A Novel Bandit-Based Approach to Hyperparameter Optimization. Journal of Machine Learning Research 18 (2018) 1-52. [arXiv:1603.06560](https://arxiv.org/abs/1603.06560) [cs.LG]

9. Tomas Mikolov, Kai Chen, Greg Corrado, Jeffrey Dean. 2013. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. [arXiv:1301.3781](#) [cs.CL]
10. Nicolò Navarin, Beatrice Vincenzi, Mirko Polato, Alessandro Sperduti. 2017. LSTM Networks for Data-Aware Remaining Time Prediction of Business Process Instances. IEEE Symposium on Deep Learning (IEEE DL'17) @ SSCI. [arXiv:1711.03822v1](#) [cs.LG]
11. An Nguyen, Srijeet Chatterjee, Sven Weinzierl, Leo Schwinn, Martin Matzner, Bjoern Eskofier. 2020. Time Matters: Time-Aware LSTMs for Predictive Business Process Monitoring. 1st International Workshop on Leveraging Machine Learning in Process Mining (ML4PM). [arXiv:2010.00889v3](#) [cs.LG]
12. Jeffrey Pennington, Richard Socher, Christopher Manning. 2014. GloVe: Global Vectors for Word Representation. DOI 10.3115/v1/D14-1162
13. Niek Tax, Ilya Verenich, Marcello La Rosa, Marlon Dumas. 2017. Predictive Business Process Monitoring with LSTM Neural Networks. Lecture Notes in Computer Science, 10253 (2017) 477-492. [arXiv:1612.02130v2](#) [stat.AP]
14. Sven Weinzierl, Sandra Zilker, Jens Brunk, Kate Revoredo, Martin Matzner, Jörg Becker. 2020. XNAP: Making LSTM-based Next Activity Predictions Explainable by Using LRP. [arXiv:2008.07993v3](#) [cs.AI]
15. Piotr Bojanowski, Edouard Grave, Armand Joulin, Tomas Mikolov. 2016. Enriching Word Vectors with Subword Information. [arXiv:1607.04606](#) [cs.CL]
16. Dzmitry Bahdanau, Kyunghyun Cho, Yoshua Bengio. 2014. Neural Machine Translation by Jointly Learning to Align and Translate. [arXiv:1409.0473](#) [cs.CL]
17. Farbod Taymouri, Marcello La Rosa, Sarah Erfani, Zahra Dasht Bozorgi, Ilya Verenich. 2020. Predictive Business Process Monitoring via Generative Adversarial Nets: The Case of Next Event Prediction. [arXiv:2003.11268](#) [cs.LG]
18. Farbod Taymouri, Marcello La Rosa, Sarah M. Erfani. 2021. A Deep Adversarial Model for Suffix and Remaining Time Prediction of Event Sequences. [arXiv:2102.07298](#) [cs.LG]
19. Tsung-Yi Lin, Priya Goyal, Ross Girshick, Kaiming He, Piotr Dollár. 2017. Focal Loss for Dense Object Detection. [arXiv:1708.02002](#) [cs.CV]
20. Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Lukasz Kaiser, Illia Polosukhin. 2017. Attention Is All You Need. [arXiv:1706.03762](#) [cs.CL]
21. Jacob Devlin, Ming-Wei Chang, Kenton Lee, Kristina Toutanova. 2018. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. [arXiv:1810.04805](#) [cs.CL]
22. Alexey Dosovitskiy, Lucas Beyer, Alexander Kolesnikov, Dirk Weissenborn, Xi-aohua Zhai, Thomas Unterthiner, Mostafa Dehghani, Matthias Minderer, Georg Heigold, Sylvain Gelly, Jakob Uszkoreit, Neil Houlsby. 2020. An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. [arXiv:2010.11929](#) [cs.CV]

Компенсация цветной дымки на данных дистанционного зондирования Земли для RGB изображений

Селюгин М.А.^{1,2}, Бочаров Д.А.²

¹ Московский физико-технический институт, Москва, Россия

² Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия

Аннотация Анализ данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) могут осложнять находящиеся в воздухе твердые частицы и аэрозоли, в связи с чем ставятся задача их компенсации на изображениях. В работе предложен новый алгоритм компенсации дымки, основанный на методе предположительно темного канала (ПТК) и концепции затухания цвета (color attenuation). Отдельное внимание уделено возможной хроматичности дымки, что вносит дополнительные цветовые искажения. Приведены результаты экспериментального исследования предложенного алгоритма и существующих подходов к компенсации дымки на аэрофотоснимках с синтетической и реальной дымкой. Показано, что предложенный алгоритм показывает лучшие результаты на данных с синтетической дымкой и сравнимые с известными в литературе методами на аэрофотоснимках с реальной дымкой.

Ключевые слова: компенсация дымки, точное земледелие, аэрофотосъемка

1 Введение

Данные дистанционного зондирования являются богатым источником информации о состоянии земной поверхности. Развитие спутниковой съемки высокого пространственного разрешения, широкое применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяют эффективно использовать данные ДЗЗ для решения различных задач точного земледелия. Например, для оценки ожидаемого урожая [1]; вегетационной активности [2]; увлажненности и засоленности почвы [3]. Анализ ДЗЗ может быть автоматизирован при помощи технологий распознавания границ полей [4], и классификации культур [5], [6].

Однако анализ сцены может осложняться вследствие некоторых факторов, негативно влияющих на качество получаемых изображений. Это могут быть облака и тени от них для данных спутниковой съёмки [7] или атмосферные явления, такие как дымка или туман. При этом в работе с данными

ДЗЗ у аграриев зачастую выбор времени зондирования существенно ограничен, что также ведет к необходимости работы со снимками более низкого качества, и в частности, с наличием дымки.

Дымка уменьшает контрастность изображения, снижает детальность, тем самым снижая качество изображения местности. Отдельно стоит отметить случаи, когда дымка имеет собственную окраску (например, дым от пожаров), из-за чего помимо влияния на пропускание излучения, оказывается влияние на наблюдаемый цвет поверхности Земли. Все это осложняет использование исходных данных ДЗЗ для анализа территории. В связи с этим ставится задача компенсации искажений, вносимых дымкой, на регистрируемых изображениях – преобразования изображения, приближающего его к виду без искажения (дымки).

Внимание данного исследования будет сфокусировано на т.н. восстанавливающих методах компенсации [8], опирающихся на оптическую модель формирования изображения, описанную в работе [9]. Часть излучения достигает сенсора, отражаясь от объекта съемки, и претерпевая при этом рассеяние, а часть попадает из атмосферы в результате рассеяния на частицах дымки.

Рассматривается поканальная модель искажения изображения, согласно которой наблюдаемое изображение \mathbf{I} может быть выражено с помощью карты пропускания $t(\mathbf{x})$ через изображение сцены, свободной от дымки \mathbf{J} и атмосферное излучение \mathbf{A} следующим образом:

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x})t(\mathbf{x}) + \mathbf{A}(\mathbf{x})(1 - t(\mathbf{x})) \quad (1)$$

Значит для вычисления свободного от дымки изображения необходимо оценить карту пропускания $t(\mathbf{x})$ и атмосферное излучение \mathbf{A} . Для этого вносятся предположения насчет природы дымки, и количественно оцениваются вносимые ею искажения, формируется карта пропускания. Для получения улучшенного изображения производится восстановление – обратная к искажению операция.

2 Обзор существующих решений по компенсации дымки

Акцент в настоящей работе будет сделан на восстанавливающих методах, основанных на алгоритме предположительно темного канала (ПТК или Dark Channel Prior), предложенном К. Хе [10].

2.1 Метод предположительно темного канала

Метод основан на предположении, касающемся свободного от дымки изображения: в некоторой окрестности каждого пикселя найдется такой, что интенсивность сигнала хотя бы в одном из его каналов пренебрежимо мала.

Однако в условиях дымки отраженный от частиц атмосферы свет увеличивает интенсивность предположительно темного канала. Данное предположение позволяет оценить карту пропускания, параметры атмосферного излучения и, в итоге, вычислить свободное от дымки изображение.

Для оценки карты пропускания рассматривается окрестность $\Omega(\mathbf{x})$ и вносится предположение, что внутри этой окрестности дымка однородна. Рассматривая поканальную модель искажения (1), после нормировки на атмосферное излучение и взятия поканального минимума получаем:

$$\min_c \left(\min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x})} \frac{I^c(\mathbf{y})}{A^c} \right) = \min_c \left(\min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x})} \frac{J^c(\mathbf{y})}{A^c} \right) + (1 - \tilde{t}(\mathbf{x})) \quad (2)$$

где $c \in \{r, g, b\}$ - один из каналов изображения, $\tilde{t}(\mathbf{x})$ - пропускание в $\Omega(\mathbf{x})$.

Далее, используя предположение темного канала, будем считать слагаемое, содержащее \mathbf{J} , равным нулю, что позволит вычислить карту пропускания:

$$\tilde{t}(\mathbf{x}) = 1 - \min_c \left(\min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x})} \frac{I^c(\mathbf{y})}{A^c} \right), \quad (3)$$

где $\tilde{t}(\mathbf{x})$ считаем постоянной в окрестности точки \mathbf{x} размера 15×15 .

Исходя из предположения, что соседние пиксели имеют близкие значения пропускания, предлагается улучшать карту пропускания путем применения сглаживающих фильтров, например ведомого (guided filter) [11]. После сглаживания малые значения $\tilde{t}(\mathbf{x})$ отбрасываются с помощью регуляризации.

Атмосферное излучение \mathbf{A} К. Хе и соавторы предлагают оценивать с помощью ПТК, усредняя значения 0.1% пикселей с максимальным значением темного канала I^{dark} .

С помощью карты пропускания $t(\mathbf{x})$ и оценки атмосферного излучения \mathbf{A} строится итоговое изображение \mathbf{J} :

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{I}(\mathbf{x}) - \mathbf{A}}{t(\mathbf{x})} + \mathbf{A} \quad (4)$$

Помимо алгоритма на основе метода предположительно тёмного канала (ПТК), предложенного К. Хе и соавторами [10], для детального анализа также были выбраны модификация алгоритма ПТК, учитывающая коррекцию цвета, которая была предложена Д. Лонгом и соавторами [12] и метод, предложенный Ж. Жу и соавторами [13], отличающийся оценкой параметров диффузного источника освещения и карты пропускания.

2.2 Метод Д. Лонга

Метод, предложенный в работе [12], имеет много общего с рассмотренным выше методом предположительно темного канала, но авторы предлагают корректировать карту пропускания, используя эмпирический параметр M , задающий порог на различие цветов:

$$t'(\mathbf{x}) = \min(\max \left(\frac{M}{|\mathbf{I}_{\mathbf{A}}(\mathbf{x}) - \mathbf{A}|}, 1 \right) \cdot t(\mathbf{x}), 1), \quad (5)$$

где \mathbf{I}_A – отношение исходного изображения \mathbf{I} к атмосферному излучению \mathbf{A} , взятое поканально. Параметр M подбирается эмпирически, в данной работе используется $M = 200$.

2.3 Метод Ч. Жу

В работах [13], [14] предлагается принципиально иной способ оценки атмосферного излучения. Авторы выдвигают концепцию затухания цвета (color attenuation), основанную на оптической модели формирования задымленного изображения (1). Ослабление изображения сцены ведет к снижению контрастности изображения, а атмосферное излучение, которое приближенно можно считать ахроматическим, увеличивает его яркость. Исходя из этого предположения предлагается построить линейную модель, с помощью которой оценивается глубина изображения $d(\mathbf{x})$:

$$d(\mathbf{x}) = \omega_0 + \omega_1 \cdot s(\mathbf{x}) + \omega_2 \cdot v(\mathbf{x}), \quad (6)$$

где $s(\mathbf{x})$ – яркость пикселя \mathbf{x} в цветовой модели HSV, $v(\mathbf{x})$ – его насыщенность.

В дальнейшем, так как в условиях дистанционного зондирования глубину изображения можно считать примерно одинаковой, данную величину будем также считать аппроксимацией карты задымленности.

Параметры модели авторы оценивают на основе данных с синтетически сгенерированной дымкой. Далее в экспериментальной части настоящей работы будут использованы значения параметров, приведённых в [14]: $\omega_0 = 0,172066$, $\omega_1 = 1,108955$, $\omega_2 = -0,952585$.

К оцененной карте задымленности для подавления ошибок классификации применяется операция вычисления оконного минимума. Затем карта задымленности используется для оценки атмосферного излучения с помощью выбора 0,1% пикселей с наибольшим значением $d(\mathbf{x})$ и поиска наиболее интенсивного пикселя среди них.

Также глубина $d(\mathbf{x})$ используется для оценки карты пропускания согласно закону Бугера-Ламберта-Бера:

$$t(\mathbf{x}) = \exp(-\beta d(\mathbf{x})). \quad (7)$$

3 Предлагаемый алгоритм

Ч. Жу и соавторы в работе [13] предлагают использовать в качестве атмосферного излучения \mathbf{A} самый интенсивный пиксель среди наиболее задымленных (с большим значением $d(\mathbf{x})$). И если рассмотрение пикселей с наибольшим значением $d(\mathbf{x})$ кажется бесспорным, то взятие самого интенсивного из них является неустойчивым решением, которое может страдать от наличия малейших ошибок в формировании карты задымления или ярких белых областей на данных ДЗЗ. Поэтому предлагается рассчитывать

среднее значение по всем пикселям с наибольшим значением $d(\mathbf{x})$ (например, превышающим 99-ый перцентиль). См. выражение (8).

$$A^c = \frac{1}{|D|} \sum_{\mathbf{x} \in D} I^c(\mathbf{x}) \quad (8)$$

$$D = \{\mathbf{x} : d(\mathbf{x}) \geq \alpha_d^{99}\},$$

где $c \in \{r, g, b\}$ – канал изображения, $I^c(\mathbf{x})$ – интенсивность пикселя \mathbf{x} в канале c , а α_d^{99} – 99й перцентиль распределения $d(\mathbf{x})$.

Что касается карты задымленности, то морфологическая фильтрация, предлагаемая Жу и соавторами в работах [13], [14], позволяет избавиться от наиболее резких ошибок, однако ее результат существенно искажает края на изображении карты задымленности, что может негативно влиять на оцениваемый по данной карте параметр атмосферного излучения \mathbf{A} . Таким образом в данной работе предлагается использовать дополнительный этап сглаживания ведомым фильтром, что потенциально может повысить точность карты $d(\mathbf{x})$, улучшить качество оценки \mathbf{A} и итоговое качество компенсации.

Помимо этого стоит отметить, что на данных ДЗЗ глубину изображения можно считать примерно одинаковой, и потому выбор в качестве карты пропускания $t(\mathbf{x}) = \exp(-\beta d(\mathbf{x}))$ дает худшую точность, чем метод предположительно темного канала. В то же время замечено, что оценка атмосферного излучения, полученная с помощью алгоритма Жу и соавторов, имеет большую точность, чем оценка, получаемая методом ПТК. Поэтому было принято решение совместить два алгоритма и вычислять атмосферное излучение с помощью карты задымленности, а карту пропускания исходя из предположения темного канала (см. алгоритм 3.1 и рис. 1).

Алгоритм 3.1 Компенсация дымки с помощью оценки атмосферного излучения по карте задымленности и расчета карты пропускания методом ПТК

Вход: RGB изображение \mathbf{I} с дымкой, вектор параметров $\boldsymbol{\omega} = (\omega_0, \omega_1, \omega_2)$, параметры ведомого фильтра r, ε

- 1: Преобразование цветовой модели изображения из RGB в HSV
- 2: Расчет карты задымленности $d(\mathbf{x})$ с помощью модели (6), в которой используются значения параметров, полученных методом максимального правдоподобия в [14]: $\omega_0 = 0,172066$, $\omega_1 = 1,108955$, $\omega_2 = -0,952585$.
- 3: Фильтрация карты задымления $d(\mathbf{x})$ с использованием оконного минимума с размером окна 15×15 и ведомого фильтра с параметрами $r = 30$, $\varepsilon = 0,01$.
- 4: Расчет атмосферного излучения \mathbf{A} с помощью сглаженной карты задымления, согласно формуле (8).
- 5: Расчет карты пропускания $t(\mathbf{x})$ с помощью метода ПТК (3).
- 6: Построение свободного от дымки изображения \mathbf{J} согласно (4)

Выход: Изображение \mathbf{J}

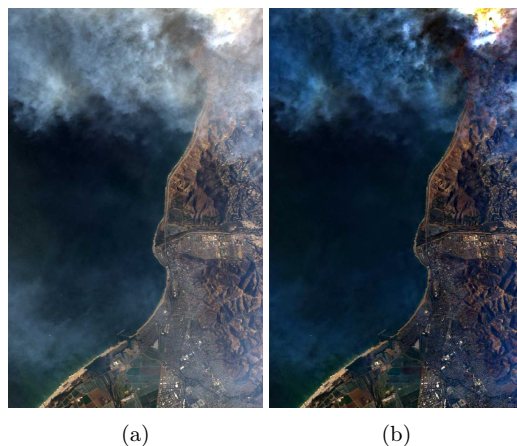


Рис. 1: Иллюстрация работы предлагаемого алгоритма: (a) – исходное изображение с дымкой, взятое из датасета AVIRIS [15]; (b) – результат компенсации дымки предлагаемым алгоритмом 3.1

4 Экспериментальное исследование

В данной главе приводятся результаты экспериментов по оценке эффективности компенсации дымки (как настоящей, так и смоделированной) разными алгоритмами. Рассматриваемые алгоритмы перечислены ниже.

1. Алгоритм ПТК с использованием ведомого фильтра (далее – IDCP).
2. Алгоритм ПТК, предложенный Лонгом и соавторами, с цветокоррекцией (далее – Long).
3. Алгоритм Жу и соавторов с использованием карты глубины для расчета карты пропускания (далее – Zhu depth).
4. Алгоритм Жу и соавторов с использованием метода предположительно темного канала для расчета карты пропускания (далее – Zhu DCP).
5. Алгоритм Жу и соавторов с использованием метода предположительно темного канала для расчета карты пропускания и оценкой атмосферного излучения усреднением по пикселям с наибольшим значением задымленности (8) (далее – Zhu mean).
6. Алгоритм Жу и соавторов с использованием сглаженной ведомым фильтром карты задымленности, метода предположительно темного канала для расчета карты пропускания и оценкой атмосферного излучения усреднением по пикселям с наибольшим значением задымленности (алгоритм 3.1, далее – Zhu mean GF).

Следующей частью исследования является проведение экспериментов по компенсации дымки для алгоритмов, разобранных в предыдущей главе.

Эксперименты предлагается проводить на данных с синтетической дымкой со сравнением референсного изображения с результатом работы алгоритма по компенсации дымки и на реальных данных с пожарами, результаты работы алгоритмов на которых будут оценены визуально.

4.1 Исследование на данных с синтетической дымкой

Для количественной оценки качества работы алгоритмов предлагается моделировать имитирующую дымку карту пропускания и сравнить результаты работы выбранных методов с исходным незадымленным изображением. Для проведения исследования из базы данных проекта AVIRIS [15] было выбрано 10 снимков земной поверхности, сделанных в ясную погоду. Это трехканальные RGB изображения размера 600×600 пикселей. Более подробно ход проведения экспериментом может быть описан следующим образом.

Алгоритм 4.1 Алгоритм оценки качества компенсации синтетической дымки на выборке данных ДЗЗ.

- 1: Генерация случайных карт пропускания с помощью граничных значений t_{min} , t_{max} , которые выбираются из равномерных распределений: $t_{min} \sim U([0; 0,25])$ и $t_{max} \sim U([0,75; 1])$.
 - 2: Создание 4 типов дымки: ахроматической равномерной с пропусканием t , равным среднему арифметическому t_{min} и t_{max} , ахроматической градиентной с пропусканием, равномерно возрастающим от t_{min} до t_{max} , а также цветной равномерной и цветной градиентной с выбором случайного цвета красного тона в качестве атмосферного излучения \mathbf{A} .
 - 3: Формирование искусственно ухудшенного изображения, согласно модели (1). См. рис. 2.
 - 4: Получение оценки качества компенсации.
-

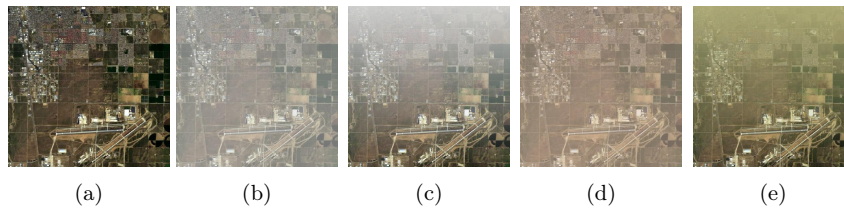


Рис. 2: Пример моделирования дымки по алгоритму 4.1: исходное RGB изображение, полученное в ясную погоду (а), ахроматическая равномерная (б), ахроматическая градиентная (с), цветная равномерная (д) и цветная градиентная (е) дымки

Количественная оценка качества компенсации Для оценки качества работы алгоритмов компенсации дымки предлагается использовать три метрики: индекс структурного сходства (SSIM), среднеквадратичную ошибку (MSE) и отношение пикового уровня сигнала к шуму (PSNR). Последние две метрики являются общепринятыми, что в значительной мере объясняется простотой вычисления и понятным физическим смыслом. Однако в них не учитываются особенности человеческого восприятия [16]. Поэтому в качестве основной метрики был выбран индекс структурного сходства.

Результаты численных экспериментов на данных с синтетической дымкой. Результаты экспериментов представлены в таблице 1 и на рисунках 3–4. В каждой ячейке приведены усредненные по 10 изображениям значения величин SSIM, MSE и PSNR. Полу жирным выделены наилучшие показатели.

Как можно видеть из таблицы, предложенный алгоритм Zhu mean GF демонстрирует по всем показателям лучшие значения для всех типов синтезированных дымок. Чуть меньшие значения наблюдаются у алгоритма IDCP. Наибольшая разница между Zhu mean GF и IDCP видна на примерах цветных градиентных дымок. Наихудшие показатели наблюдаются у алгоритма Zhu depth.

Как видно из таблицы 1 и рисунков 3–4 значения показателей качества согласуются с визуализациями результатов работы: алгоритм Zhu mean GF выдаёт изображение с наименьшими искажениями цветов и наиболее похожим на исходный «чистый» снимок.

Метод\Тип дымки	Ахроматическая равномерная			Ахроматическая градиентная			Цветная равномерная			Цветная градиентная		
	SSIM	MSE	PSNR	SSIM	MSE	PSNR	SSIM	MSE	PSNR	SSIM	MSE	PSNR
IDCP	0,876	890	19,8	0,857	1070	18,8	0,819	1940	16,7	0,737	3250	14,4
Long	0,789	2330	14,7	0,810	2230	14,8	0,799	1470	16,9	0,765	2460	14,7
Zhu depth	0,722	1960	15,5	0,711	2230	15,1	0,754	2290	15,7	0,545	5600	11,7
Zhu DCP	0,871	1020	19,0	0,849	1190	18,6	0,810	2130	16,1	0,720	3440	14,0
Zhu mean	0,873	750	20,7	0,863	970	18,9	0,828	1700	17,3	0,771	2700	15,2
Zhu mean GF	0,878	616	21,7	0,87	630	20,8	0,829	1660	17,8	0,806	2070	16,6

Таблица 1: Результаты экспериментов по оценке качества компенсации четырех типов синтетической дымки на данных ДЗЗ. Полу жирным шрифтом выделены лучшие показатели.

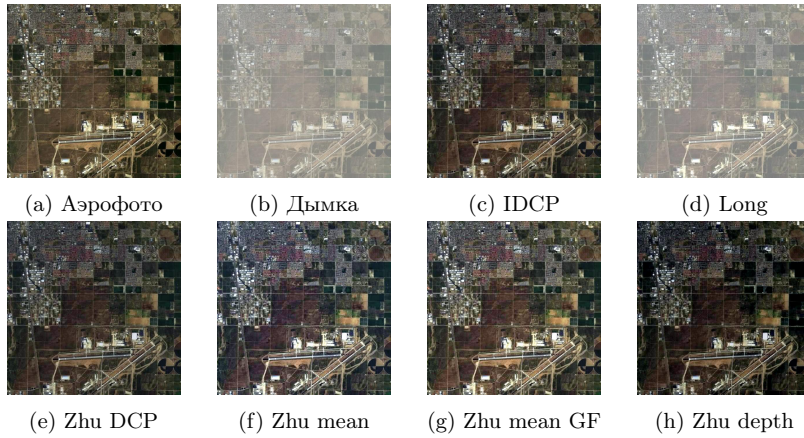


Рис. 3: Пример работы алгоритмов компенсации дымки на данных с синтетической дымкой. Видно, что все алгоритмы, кроме алгоритма Лонга, справились с задачей хорошо и отличаются в основном балансом белого.

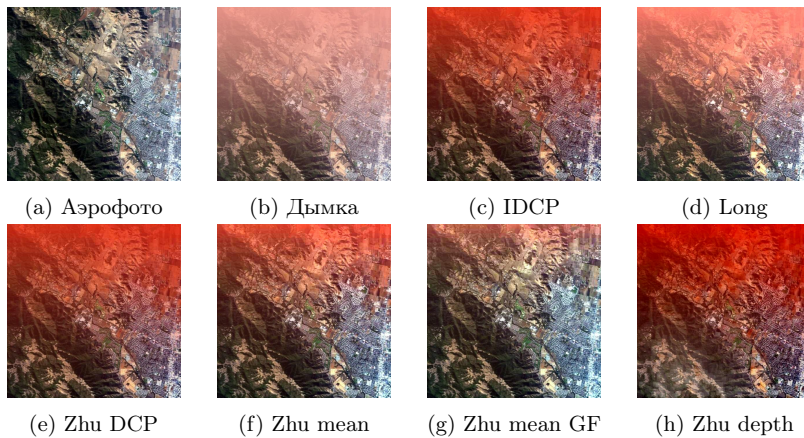


Рис. 4: Пример работы алгоритмов компенсации дымки на данных с синтетической дымкой. Как видно, результаты довольно сильно отличаются: только алгоритм оценки атмосферного излучения по Ч. Жу с усреднением (рис. (g)) оценил атмосферное излучение достаточно точно. В то время как алгоритм ПТК сделал красный цвет дымки более контрастным, не улучшив изображения

4.2 Исследование на реальных данных с пожарами

Для исследования работы предложенных алгоритмов компенсации на реальных данных были выбраны снимки из базы данных AVIRIS [15], содержащие дымку, и проведен визуальный анализ (рис. 5–6)

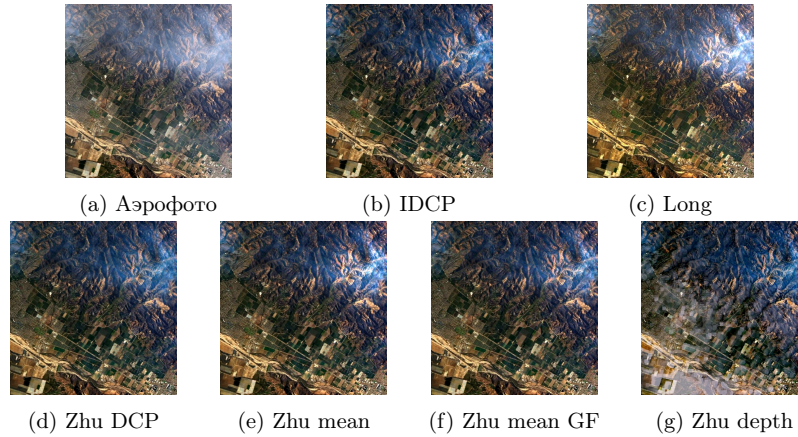


Рис. 5: Пример работы алгоритмов компенсации дымки на реальных данных. Видно, что алгоритмы работают примерно одинаково: цвета становятся более контрастными, но дымка синее

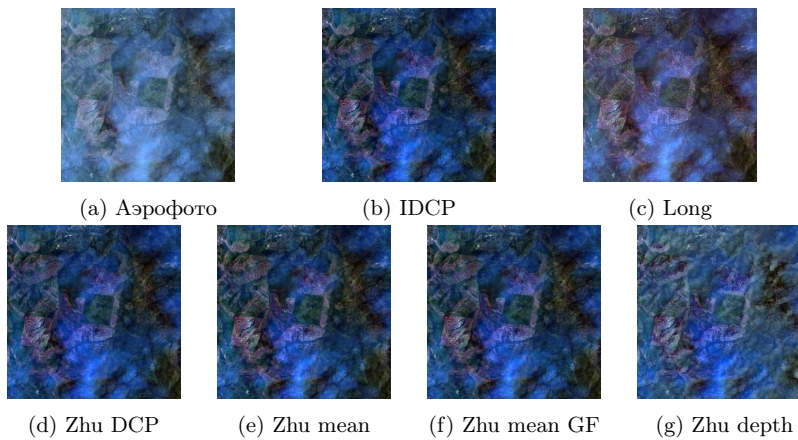


Рис. 6: Пример работы алгоритмов компенсации дымки на реальных данных. Видно, что алгоритмы совсем не справляются с дымкой даже средней плотности. Выделяется изображение с цветокоррекцией от Long, однако качественно картина остается той же

5 Заключение

Подводя итоги экспериментов, можно отметить, что предложенные модификации позволили достичь прироста качества компенсации на данных с синтетической дымкой. Кроме того, на реальных данных в областях с дымкой относительно небольшой плотности все алгоритмы, за исключением *Zhu depth*, демонстрируют визуальное улучшение изображения. Более высокое качество работы на синтетических данных можно объяснить тем, что оптическая модель формирования изображения (1) является приближенной. Поэтому восстановление изображения, зашумленного по данной модели, происходит лучше, чем компенсация реальной дымки.

Стоит также заметить, что рассмотренные в работе примеры снимков с реальной дымкой по сложности заметно отличаются от смоделированных данных: с цветной дымкой, плотность которой сильно варьируется от полнотью непрозрачной до почти прозрачной.

Помимо этого хотелось бы подчеркнуть следующие результаты.

- Эксперименты на данных с синтетической дымкой показали, что алгоритм 3.1 с оценкой атмосферного излучения по фильтрованной карте задымления дает наилучшие показатели по всем рассмотренным метрикам на всех типах дымки. State-of-the-art алгоритм ПТК также демонстрирует хорошие результаты на всех дымках, кроме цветной градиентной, где неплохо показывает себя алгоритм Лонга с цветокоррекцией.
- Несмотря на лучшее распознавание цвета диффузного излучения по карте задымления с усреднением, результаты на реальных данных получились визуально сопоставимые. Это можно объяснить тем, что цвет дымки непостоянен и некоторые отличия в механизме его определения вносят лишь небольшой прогресс в процесс компенсации дымки.
- Цветокоррекция, предлагаемая Лонгом и соавторами, не вносит заметного вклада в результат. Возможно это связано с тем, что подбор гиперпараметра коррекции M (в выражении (5)) должен производиться индивидуально для каждого снимка, что является довольно трудозатратным.
- Карта пропускания, сформированная по карте глубины показала свою несостоятельность при работе на реальных данных. Относительная высота объектов сцены невелика по сравнению с высотой съемки, потому карта глубины дает довольно грубые результаты, а где-то и вовсе ухудшает изображение.
- Фильтрация карт задымления и пропускания является важным этапом работы алгоритма компенсации дымки. На синтетических дымках заметно, что цвет излучения, определенный по фильтрованной карте задымления, получается точнее. На реальных же данных несостоятельность результатов алгоритма с определением карты пропускания как функции от глубины также во многом можно объяснить отсутствием сглаживания.
- Достаточно хорошие показатели быстродействия (порядка пары секунд для компенсации дымки на изображении разрешения 600×600) показывают все рассмотренные алгоритмы.

Резюмируя, в работе была исследована задача компенсации дымки, в том числе окрашенной, на аэрофотоснимках земной поверхности. Был предложен новый алгоритм компенсации дымки, состоящий в оценке атмосферного излучения согласно концепции затухания цвета и расчете карты пропускания методом ПТК. Были проведены вычислительные эксперименты по исследованию качества компенсации на данных с синтетической и реальной дымкой. Результаты тестирования продемонстрировали, что предложенный алгоритм показывает лучшие результаты на данных с синтетической дымкой, а на изображениях с реальной дымкой качество его работы сопоставимо с другими рассмотренными алгоритмами.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №20-61-47089).

Список литературы

- [1] T. Ahamed, L. Tian, Y. Zhang и K. Ting. “A review of remote sensing methods for biomass feedstock production”. В: *Biomass and Bioenergy* 35.7 (2011), с. 2455–2469. issn: 0961-9534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.028> (цит. на с. 1).
- [2] P. S. Thenkabail и J. G. Lyon. *Hyperspectral remote sensing of vegetation*. CRC press, 2016 (цит. на с. 1).
- [3] E. Ben-Dor. “Quantitative remote sensing of soil properties”. В: *Advances in Agronomy* 75 (дек. 2002), с. 173–243. DOI: [10.1016/S0065-2113\(02\)75005-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75005-0) (цит. на с. 1).
- [4] В. А. Тимофеев, М. А. Павлова, А. А. Смагина и Д. А. Бочаров. “Сегментация полей на спутниковых снимках Sentinel-2 с использованием исторических данных вегетационных индексов”. В: *ИТУС 2021*. -, 2022 (цит. на с. 1).
- [5] N. Kussul, M. Lavreniuk, S. Skakun и A. Shelestov. “Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data”. В: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 14.5 (2017), с. 778–782. DOI: [10.1109/LGRS.2017.2681128](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2681128) (цит. на с. 1).
- [6] Н. А. Фирсов, В. В. Подлипов, П. П. Николаев, С. В. Машков, П. А. Ишкин, Р. В. Скиданов и А. В. Никоноров. “Нейросетевая классификация гиперспектральных изображений растительности с формированием обучающей выборки на основе адаптивного вегетационного индекса”. В: *Компьютерная оптика* 45.6 (2021). Под ред. С. В. Александрович. DOI: [10.18287/2412-6179-CO-1038](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1038), с. 887–896 (цит. на с. 1).
- [7] Д. А. Бочаров, Д. П. Николаев, М. А. Павлова и В. А. Тимофеев. “Алгоритм детекции и компенсации теней от облаков на мультиспектральных спутниковых снимках для местностей сельскохозяйственных угодий”. В: *Информационные процессы* 21.4 (2021), с. 295–312. DOI: [10.53921/18195822_2021_21_4_295](https://doi.org/10.53921/18195822_2021_21_4_295) (цит. на с. 1).

- [8] W. Wang и X. Yuan. “Recent advances in image dehazing”. В: *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 4 (январь. 2017), с. 410–436. DOI: [10.1109/JAS.2017.7510532](https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510532) (цит. на с. 2).
- [9] Y. Li, S. You, M. S. Brown и R. T. Tan. “Haze visibility enhancement: A Survey and quantitative benchmarking”. В: *Computer Vision and Image Understanding* 165 (2017), с. 1–16. ISSN: 1077-3142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2017.09.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077314217301595> (цит. на с. 2).
- [10] K. He, J. Sun и X. Tang. “Single image haze removal using dark channel prior”. В: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 33.12 (2010), с. 2341–2353 (цит. на с. 2, 3).
- [11] S. Lee, S. Yun, J.-H. Nam, C. S. Won и S.-W. Jung. “A review on dark channel prior based image dehazing algorithms”. В: *EURASIP Journal on Image and Video Processing* 2016.1 (2016), с. 1–23 (цит. на с. 3).
- [12] J. Long, Z. Shi, W. Tang и C. Zhang. “Single Remote Sensing Image Dehazing”. В: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 11.1 (2014), с. 59–63. DOI: [10.1109/LGRS.2013.2245857](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2245857) (цит. на с. 3).
- [13] Q. Zhu, J. Mai и L. Shao. “A Fast Single Image Haze Removal Algorithm Using Color Attenuation Prior”. В: *IEEE Transactions on Image Processing* 24.11 (2015), с. 3522–3533. DOI: [10.1109/TIP.2015.2446191](https://doi.org/10.1109/TIP.2015.2446191) (цит. на с. 3–5).
- [14] Z. Zhu, Y. Luo, H. Wei, Y. Li, G. Qi, N. Mazur, Y. Li и P. Li. “Atmospheric Light Estimation Based Remote Sensing Image Dehazing”. В: *Remote Sensing* 13.13 (2021). ISSN: 2072-4292. DOI: [10.3390/rs13132432](https://doi.org/10.3390/rs13132432) (цит. на с. 4, 5).
- [15] *AVIRIS Data Portal*. <https://aviris.jpl.nasa.gov/dataportal/>. Дата обращения: 2022-04-10. 2006–2021 (цит. на с. 6, 7, 10).
- [16] Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh и E. Simoncelli. “Image quality assessment: from error visibility to structural similarity”. В: *IEEE Transactions on Image Processing* 13.4 (2004), с. 600–612. DOI: [10.1109/TIP.2003.819861](https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861) (цит. на с. 8).

Экспериментальное исследование качества компенсации теней от облаков на мультиспектральных данных спутников Sentinel-2 и Landsat 8

Павлова М.А., Бочаров Д.А.

Институт проблем передачи информации,
Российская академия наук, Москва, Россия,
pavlovamar96@yandex.ru, bocharov.mitry@gmail.com

Аннотация В работе рассматривается задача детекции и компенсации теней от облаков на мультиспектральных спутниковых снимках. Приведены результаты расширенных вычислительных экспериментов по оценке качества компенсации разработанного алгоритма на открытых данных дистанционного зондирования Земли со спутников Sentinel-2 и Landsat 8. Показано, что предложенный алгоритм позволяет в среднем в 4 раза приблизить значения спектральных каналов в затенённых областях к освещённым той же поверхности, что в 1.3 раз лучше, чем алгоритм на основе Gray-World модели. Также показано, что разработанный алгоритм позволяет существенно снизить влияние теней от облаков на значения индексов NDVI, NDWI, NDMI, BSI, вычисленных по скомпенсированным каналам.

Ключевые слова: точное земледелие, компенсация теней, Sentinel-2, Landsat, вегетационные индексы

1 Введение

Данные дистанционного зондирования широко используются в сельском хозяйстве. Мультиспектральные снимки, полученные такими программами как Landsat [1], Sentinel [2], IKONOS [3] и др. [4], активно применяются в точном земледелии для анализа и мониторинга сельскохозяйственных угодий [5]. Эти снимки часто бывают подвержены различным атмосферным и аппаратным искажениям, что усложняет их анализ [6]. Облака, перекрывающие значительную часть поверхности Земли, оставляют на видимой части сцены тени, которые искажают наблюдаемые спектральные характеристики поверхности. Это в свою очередь приводит к неправильным расчетам различных вегетационных показателей. Например, индекс Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [7] ложно детектирует такие участки как области с низкой вегетацией. Таким образом, возникает задача компенсации отсутствия прямого источника света для затененных областей изображения [8].

Данная работа устроена следующим образом: в разделе 2 формулируется задача компенсации теней; в разделе 3 описывается разработанный алгоритм, который ранее был приведён в работах [9,10]; в разделе 4 описаны данные, методика экспериментов и полученные результаты.

2 Постановка задачи

Рассмотрим следующую модель формирования мультиспектрального изображения \mathbf{I} в точке \mathbf{x} :

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}) = (\mathbf{L}_d k(\mathbf{x}) + \mathbf{L}_e) \mathbf{R}(\mathbf{x}), \quad (1)$$

где \mathbf{L}_d и \mathbf{L}_e – вектора прямого и диффузного компонент источника освещения, $k(\mathbf{x})$ – коэффициент освещённости прямым источником \mathbf{L}_d ($k(\mathbf{x}) = 0$ означает что точка \mathbf{x} находится в тени), а $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ – вектор отражательной способности.

Считая $k(\mathbf{x}) = 1$ для всех точек изображения, мы получим модель изображения без теней \mathbf{I}^* :

$$\mathbf{I}^*(\mathbf{x}) = (\mathbf{L}_d + \mathbf{L}_e) \mathbf{R}(\mathbf{x}). \quad (2)$$

Домножив и разделив выражение (2) на $(\mathbf{L}_d k(\mathbf{x}) + \mathbf{L}_e)$ и подставив в (1), мы можем выразить \mathbf{I}^* через \mathbf{I} в следующем виде:

$$\mathbf{I}^*(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{L}_d + \mathbf{L}_e}{\mathbf{L}_d k(\mathbf{x}) + \mathbf{L}_e} \mathbf{I}(\mathbf{x}) = \mathbf{c}(\mathbf{x}) \mathbf{I}(\mathbf{x}). \quad (3)$$

Задача заключается в оценке вектора \mathbf{c} по имеющемуся мультиспектральному изображению \mathbf{I} .

3 Обзор работ

В работе Гуо и соавторов [11] предполагаются не бинарные значения $k \in [0, 1]$, что позволяет учитывать наличие полутеней и плавный переход от освещённой области к теневой. Авторы определяют величину $\mathbf{r} = \frac{\mathbf{L}_d}{\mathbf{L}_e}$, которая характеризует отношение компонент прямого излучения к диффузному, для оценки которой предлагают находить парные области внутри и вне тени (a^S, a^L) и вычислять по ним средние значения интенсивностей $\bar{\mathbf{I}}$ и степени затенения \bar{k} . Для равномерно распределённых областей вдоль контура теней вычисляется набор значений \mathbf{r}_i следующего вида:

$$\mathbf{r}_i = \frac{\bar{\mathbf{I}}_{a^L} - \bar{\mathbf{I}}_{a^S}}{\bar{\mathbf{I}}_{a^S} \bar{k}_{a^L} - \bar{\mathbf{I}}_{a^L} \bar{k}_{a^S}}, \quad (4)$$

где $\bar{\mathbf{I}}_{a^L}, \bar{\mathbf{I}}_{a^S}$ – вектора средних интенсивностей внутри освещённой и затенённой областей a^L, a^S . Итоговая величина \mathbf{r} определяется голосующей схемой среди всех \mathbf{r}_i , где i – индекс пары областей.

В работе Силва и соавторов [12], в отличие от работы [11], величина k считается бинарной, а значения \mathbf{r} предлагается вычислять следующим путём:

$$\mathbf{r} = \frac{\bar{\mathbf{I}}^L - \bar{\mathbf{I}}^S}{\bar{\mathbf{I}}^S}, \quad (5)$$

где $\bar{\mathbf{I}}^L, \bar{\mathbf{I}}^S$ – средние значения изображения для освещённых и затенённых областей изображения, что согласуется с Gray-World предположением [13].

Метод, предложенный в работе [14], в отличие от рассмотренных выше решений, заключается в вычислении набор величин $\{\mathbf{r} = \frac{\mathbf{I}_d}{\mathbf{I}_c}\}$ по областям, полученным в результате сегментации изображения по критерию цветовой и текстурной однородности, а итоговый вектор $\hat{\mathbf{r}}$ оценивался через выборочные средние значения.

4 Алгоритм

Алгоритм компенсации теней (Рис. 2) состоит из двух основных этапов. На первом этапе вычисляются бинарные маски облаков и теней от них. В рассматриваемом алгоритме этот расчёт выполняется на основе модифицированного Shadow Detection Index (SDI') [15]. Индекс SDI рассчитывается следующим образом:

$$SDI = \frac{2 - PC_1}{(GREEN - BLUE) \cdot RED + 1}, \quad (6)$$

где $RED, GREEN, BLUE$ – нормализованные значения каналов в красном, зелёном и синем диапазонах соответственно, а PC_1 – нормализованное значение первой главной компоненты.

Существенным его недостатком является плохая различимость теней и поверхностей с высокими значениями в красном диапазоне спектра. Для устранения этого эффекта предлагается вычитать из SDI значения красного канала:

$$SDI' = \max((SDI - RED), 0), \quad (7)$$

где \max – операция поэлементного максимума.

Определение порогов облаков и теней производилось автоматически по гистограмме SDI' -изображения. Подбор порогов производился методом минимального порога [16], причем для оценки порога значений тени исключались все пиксели, отнесенные к облакам. К маске теней применялся ряд фильтров, чтобы уменьшить влияние водной поверхности, которая так же дает ложные срабатывания SDI , и выделить тени от полупрозрачных облаков.

На рисунке 1 приведен пример работы детектора теней и облаков на основе модифицированного SDI .

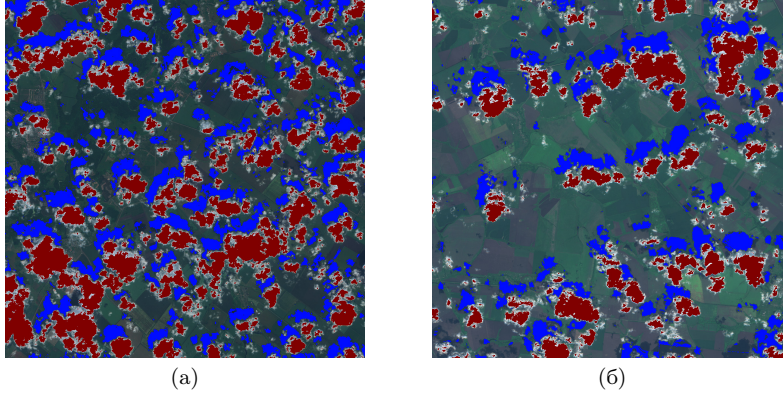


Рис. 1. Примеры детектирования облаков и теней: красным обозначены облака, синим – тени.

Второй этап представляет собой процесс непосредственно восстановления затенённой области. Поскольку облака неоднородны, предполагается, что влияние отсутствия компоненты прямого излучения \mathbf{L}_d для разных теней различно. Исходя из этого предположения, в рассматриваемом алгоритме вектор \mathbf{c} оценивается индивидуально для каждой тени. Оценка компонента c^j для j -ой тени осуществляется с использованием робастного подхода, основанного на вычислении медианы отношений яркости пикселей вне и внутри тени:

$$\hat{\mathbf{c}}^j = (\hat{c}_1, \dots, \hat{c}_N), \hat{c}_\xi = \text{median}_i \{c_{i,\xi}^j\}_{i=0}^{n_j}, c_{i,\xi}^j = \frac{I_\xi(\mathbf{x}_i^L)}{I_\xi(\mathbf{x}_i^S) + \epsilon}, \quad (8)$$

где $I_\xi(\mathbf{x}_i^L)$, $I_\xi(\mathbf{x}_i^S)$ – интенсивности ξ -го канала изображения \mathbf{I} в точках, лежащих на равноудалённых расстояниях от границы тени вне неё (\mathbf{x}^L) и внутри (\mathbf{x}^S), а ϵ – малая константа.

Изображение со скомпенсированными тенями $\hat{\mathbf{I}}^*$ вычисляется следующим образом:

$$\hat{\mathbf{I}}^*(\mathbf{x}_j^S) = \hat{\mathbf{c}}^j \circ \mathbf{I}(\mathbf{x}_j^S). \quad (9)$$

На рисунке 2 приведена блок-схема алгоритма. Его более подробное описание приведено в работах [9,10].

5 Эксперименты

В предыдущих исследованиях [9,10] приводятся результаты сравнения на данных спутника Sentinel-2 для 4 каналов (B2, B3, B4, B8) и одного индекса (NDVI). В настоящей работе приводятся результаты оценки качества компенсации теней на данных спутников Sentinel-2 и Landsat 8. Оценка

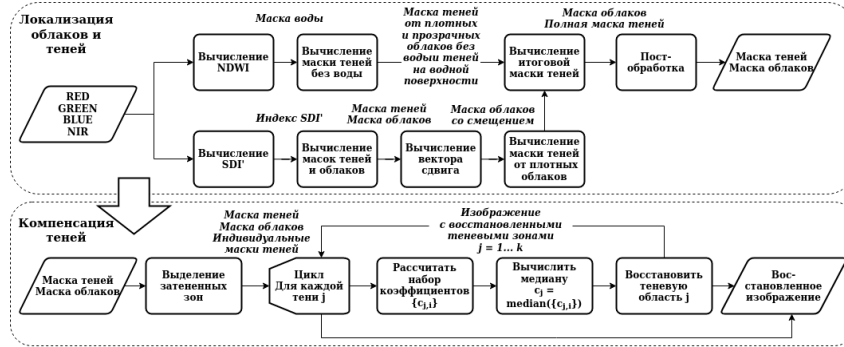


Рис. 2. Блок-схема алгоритма компенсации теней.

качества проводилась как на спектральных каналах (8 для Sentinel-2 и 5 для Landsat 8), так и на вычисленных по обработанным каналам индексах Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), Bare Soil Index (BSI). Всего использовалось 10 снимков для Sentinel-2 и 6 для Landsat 8.

Оценка качества осуществлялась по методике с использованием только имеющихся изображений, т.к. получить данные без облаков и, соответственно, теней с идентичными состояниями поверхности Земли не представляется возможным. Для этого были экспертно размечены пары квадратных областей (с размерами 10 на 10 пикселей для спутника Sentinel-2 и 7 на 7 пикселей для Landsat 8), принадлежащих одной и той же поверхности, но лежащих по разные стороны от границы тени. Для каждой такой пары областей вычислялась следующая величина:

$$\rho_k = \|\bar{\mathbf{I}}_{a_k^S} - \bar{\mathbf{I}}_{a_k^L}\|_2, \quad \bar{\mathbf{I}}_{a_k^S} = \frac{1}{n_k^S} \sum_{\mathbf{x}_k^S \in a_k^S} \mathbf{I}(\mathbf{x}_k^S), \quad \bar{\mathbf{I}}_{a_k^L} = \frac{1}{n_k^L} \sum_{\mathbf{x}_k^L \in a_k^L} \mathbf{I}(\mathbf{x}_k^L), \quad (10)$$

где k – индекс пары областей, a_k^L и a_k^S – области вне и внутри тени, соответственно, n_k^L и n_k^S – их площади.

Всего для 16 изображений имелось 320 пар областей с 20 областями в среднем на изображение.

Для сравнения исследуемого алгоритма в результатах экспериментов приведены значения для алгоритма, предложенного в работе [12] и основанного на отношении средних значений многоканального изображения в участках внутри и вне тени, что согласуется с Gray-World предположением.

В таблицах 1 и 2 приведены средние и медианные значения спектральных расстояний (ρ_{avg} , ρ_{50}) для спутников Sentinel-2 и Landsat 8 соответственно. Расстояния вычислялись для 8 каналов Sentinel-2 (B2, B3, B4, B6, B8, B8A, B11, B12), 5 каналов Landsat 8 (L8B2, L8B3, L8B4, L8B5, L8B6) и

4 указанных ранее индексов по всем патчам для каждого рассмотренного примера. *INIT* – обозначает исходные некомпенсированные данные, *GW* – алгоритм [12] на основе Gray-World модели, *MED* – алгоритм [9,10]. Кроме этого, исследовалась модификация алгоритма *MED* – *MED**, которая согласуется с предположением о в среднем одинаковой степени затенения для всех облаков. В данной модификации коэффициент с вычислялся не для каждой тени, а один для всех. Чтобы провести оценку качества непосредственно компенсации, для всех сравниваемых алгоритмов использовались одинаковые маски облаков и теней. Алгоритм *GW* также был модифицирован, чтобы избежать влияния пикселей облаков на расчет коэффициента компенсации.

Как видно из таблиц, все рассматриваемые алгоритмы улучшают качество каналов исходного изображения и рассчитываемых на их основе индексов. Алгоритм *MED* имеет лучшие средние показатели, чем *MED** и *GW*, для спутников Sentinel-2 и Landsat 8, что косвенно подтверждает предположение о влиянии неоднородности облаков на коэффициент компенсации. Этот алгоритм компенсирует каналы по сравнению с исходными данными на 74% для Sentinel-2 и на 78% для Landsat 8, а индексы – на 74% и 68% соответственно. Алгоритм *GW* компенсирует каналы на 65% для Sentinel-2 и на 68% для Landsat 8, индексы – на 53% и на 54%. Алгоритм *MED** компенсирует каналы на 60% для Sentinel-2 и на 72% для Landsat 8, индексы – на 64% и на 60%.

На рисунках 3 и 4 приведена визуализация двух участков без обработки и результат работы исследуемых алгоритмов. Верхний ряд изображений (а, б, в, г) – RGB-снимки визуализированного участка, нижний (д, е, ж, з) – вегетационный индекс NDVI. Как видно на картах индекса, тени от облаков существенно снижают его значение. Появление таких областей может быть ложно интерпретировано как стрессовое состояние растительности.

На рисунке 4 также можно заметить, что алгоритм детекции теней не очень хорошо справляется с детектированием граничной части тени. Для сглаживания этого эффекта при расчете коэффициентов используется значительный отступ от детектированной границы в обоих направлениях.

На данных Sentinel-2 алгоритм *MED** справляется с задачей компенсации теней на каналах хуже, чем алгоритм *GW*, в то время как индексы, построенные на основе скомпенсированных каналов, имеют лучшие показатели. Это связано с тем, что для Sentinel-2 доступно больше исходных каналов, чем для Landsat 8, однако не все они применяются для построения рассматриваемых индексов. Таким образом, алгоритм *GW* лучше работает на каналах *B11*, *B8A* и *B6*, чем *MED**, что очевидным образом влияет на разницу в оценке компенсации каналов и индексов.

6 Заключение

В работе рассмотрена задача компенсации теней от облаков на мультиспектральных спутниковых снимках и приведены результаты расширенных вы-

Показатель	Image 1				Image 2				Image 3			
	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>
$\rho_{avg, channels}$	2.38	0.73	0.88	0.50	2.46	0.72	0.88	0.61	3.42	1.15	1.46	0.91
$\rho_{50, channels}$	2.33	0.75	0.91	0.32	2.31	0.70	0.82	0.52	3.19	0.91	1.35	0.80
$\rho_{avg, indices}$	1.67	1.05	0.73	0.60	1.79	1.17	0.84	0.58	5.38	1.04	1.12	0.63
$\rho_{50, indices}$	1.36	1.01	0.58	0.37	1.23	1.07	0.56	0.26	5.16	0.90	0.85	0.57
Показатель	Image 4				Image 5				Image 6			
	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med*</i>
$\rho_{avg, channels}$	2.59	0.95	0.80	0.57	3.19	1.02	0.97	0.60	4.54	1.70	1.66	1.28
$\rho_{50, channels}$	2.50	0.75	0.61	0.50	3.04	0.94	0.87	0.50	4.58	1.62	1.59	1.03
$\rho_{avg, indices}$	1.91	1.17	0.71	0.74	2.39	1.00	0.78	0.6	4.93	1.31	1.22	1.14
$\rho_{50, indices}$	1.26	0.84	0.39	0.35	1.07	0.66	0.36	0.34	1.57	0.68	0.66	0.37
Показатель	Image 7				Image 8				Image 9			
	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>
$\rho_{avg, channels}$	2.86	1.04	0.92	0.66	2.94	1.00	1.38	0.85	3.13	1.33	1.75	1.25
$\rho_{50, channels}$	2.58	0.78	0.80	0.52	2.80	0.75	1.16	0.76	2.76	1.15	1.62	0.98
$\rho_{avg, indices}$	2.93	0.97	0.73	0.55	2.82	1.34	1.33	0.99	2.90	1.22	1.37	1.03
$\rho_{50, indices}$	1.12	0.81	0.45	0.39	1.46	0.92	0.77	0.47	2.79	1.19	1.41	0.86
Показатель	Image 10				MEAN							
	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>				
$\rho_{avg, channels}$	2.33	1.22	1.32	0.95	2.98	1.09	1.20	0.82				
$\rho_{50, channels}$	2.49	1.02	1.32	0.88	2.86	0.94	1.10	0.68				
$\rho_{avg, indices}$	2.77	1.84	1.18	0.95	2.95	1.21	1.00	0.78				
$\rho_{50, indices}$	1.26	1.63	0.93	0.75	1.83	0.97	0.70	0.47				

Таблица 1. Средние и медианные значения ρ по экспертно заданным патчам для каждого изображения (*channels* для каналов и *indices* для индексов) Sentinel-2: *INIT* – качество до компенсации, *GW* – алгоритм на основе Gray-World модели, *MED* – алгоритм на основе медианной оценки каждой тени, *MED6** – алгоритм на основе общего медианного коэффициента.

числительных экспериментов по оценке качества компенсации разработанного алгоритма на открытых данных дистанционного зондирования Земли со спутников Sentinel-2 и Landsat 8. Тестирование проведено на 10 снимках со спутников Sentinel-2 и 6 снимках со спутника Landsat 8. Оценено ка-

Показатель	Image 1				Image 2				Image 3			
	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>
$\rho_{avg, channels}$	2.51	0.97	0.75	0.64	2.34	0.78	0.68	0.59	2.62	0.97	0.91	0.82
$\rho_{50, channels}$	2.57	1.01	0.71	0.60	2.25	0.65	0.59	0.38	2.70	1.02	0.89	0.77
$\rho_{avg, indices}$	2.36	1.02	0.84	0.77	3.35	1.93	1.80	1.59	3.09	1.74	1.53	1.41
$\rho_{50, indices}$	2.42	1.05	0.78	0.67	2.31	1.02	0.76	0.75	2.48	1.40	0.99	0.92
Показатель	Image 4				Image 5				Image 6			
	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>
$\rho_{avg, channels}$	2.70	0.84	0.73	0.59	2.53	0.56	0.50	0.34	3.2	1.04	1.00	0.83
$\rho_{50, channels}$	2.69	0.72	0.60	0.52	2.47	0.46	0.42	0.26	3.27	1.09	1.07	0.41
$\rho_{avg, indices}$	3.76	1.76	1.69	1.32	2.52	1.19	1.19	0.79	4.33	1.75	1.74	1.12
$\rho_{50, indices}$	2.63	1.30	1.04	0.78	1.89	0.47	0.42	0.28	4.27	1.61	1.61	1.07
Показатель	MEAN											
	<i>INIT</i>	<i>GW</i>	<i>Med*</i>	<i>Med</i>								
$\rho_{avg, channels}$	2.65	0.86	0.76	0.63								
$\rho_{50, channels}$	2.66	0.82	0.71	0.49								
$\rho_{avg, indices}$	3.23	1.56	1.46	1.17								
$\rho_{50, indices}$	2.67	1.14	0.93	0.74								

Таблица 2. Средние и медианные значения ρ по экспертно заданным патчам для каждого изображения (*channels* для каналов и *indices* для индексов) Landsat 8: *INIT* – качество до компенсации, *GW* – алгоритм на основе Gray-World модели, *MED* – алгоритм на основе медианной оценки каждой тени, *MED6** – алгоритм на основе общего медианного коэффициента.

чество компенсации для совокупности каналов и вегетационных индексов, построенных на их основе. Результаты тестирования демонстрируют, что алгоритм на основе медианной независимой оценки коэффициента каждой тени позволяет приблизить интенсивности каналов и индексов внутри тени к значениям вне нее в 4,35 и 3,5 раз по сравнению с исходными данными соответственно.

Одним из направлений дальнейших исследований планируется улучшение точности детектирования обработки границ теней.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №20-61-47089).

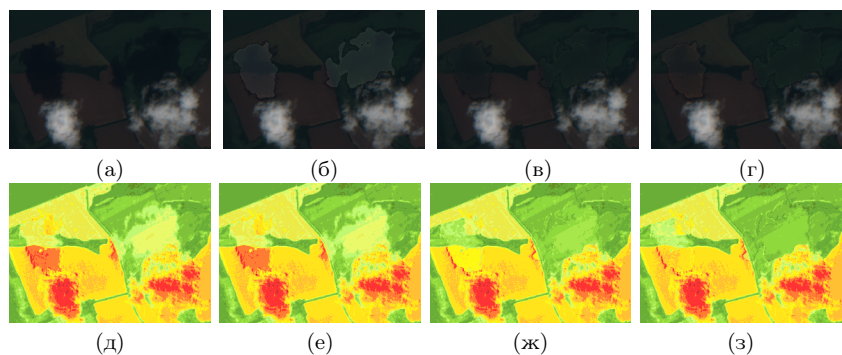


Рис. 3. Изображения RGB и NDVI: (а, д) – без обработки, (б, е) – обработанные *GW*, (в, ж) – *MED**, (г, з) – *MED*.

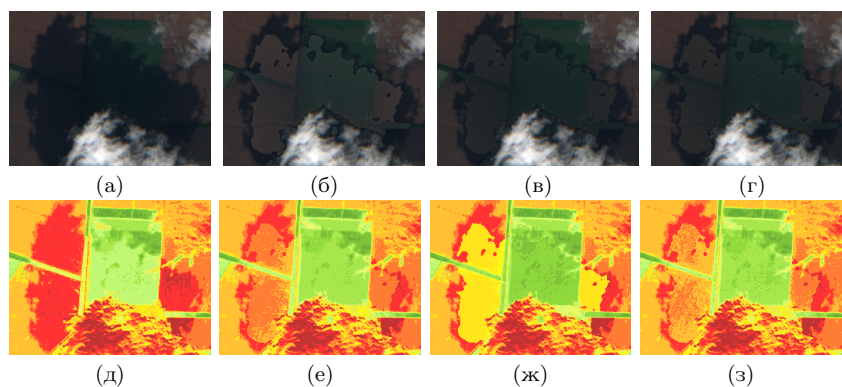


Рис. 4. Изображения RGB и NDVI: (а, д) – без обработки, (б, е) – обработанные *GW*, (в, ж) – *MED**, (г, з) – *MED*.

Список литературы

1. Loveland Thomas R, Dwyer John L. Landsat: Building a strong future // Remote Sensing of Environment. — 2012. — Vol. 122. — P. 22–29.
2. Sentinels for science: Potential of Sentinel-1,-2, and-3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land / Malenovský Zbyněk, Rott Helmut, Cihlar Josef, Schaepman Michael E, García-Santos Glenda, Fernandes Richard, and Berger Michael // Remote Sensing of environment. — 2012. — Vol. 120. — P. 91–101.
3. IKONOS satellite, imagery, and products / Dial Gene, Bowen Howard, Gerlach Frank, Grodecki Jacek, and Oleszczuk Rick // Remote sensing of Environment. — 2003. — Vol. 88, no. 1-2. — P. 23–36.
4. Zhang Chongyuan, Marzougui Afef, Sankaran Sindhuja. High-resolution satellite imagery applications in crop phenotyping: an overview // Computers and

- Electronics in Agriculture. — 2020. — Vol. 175. — P. 105584.
5. Сегментация полей на спутниковых снимках Sentinel-2 с использованием исторических данных вегетационных индексов / Тимофеев Валерий Андреевич, Павлова М. А., Смагина А. А., and Бочаров Д. А. // ИТиС 2021. — . — 2022.
 6. Карнаухов ВН, Кобер ВИ. Анализ характеристик линейных искажений в задачах восстановления мультиспектральных изображений // Информационные процессы. — 2017. — Vol. 17, no. 2. — P. 114–122.
 7. Carlson Toby N, Ripley David A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // Remote sensing of Environment. — 1997. — Vol. 62, no. 3. — P. 241–252.
 8. Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing / Shahtahmassebi AmirReza, Yang Ning, Wang Ke, Moore Nathan, and Shen Zhangquan // Chinese geographical science. — 2013. — Vol. 23, no. 4. — P. 403–420.
 9. Алгоритм детекции и компенсации теней от облаков на мультиспектральных спутниковых снимках для местностей сельскохозяйственных угодий / Бочаров ДА, Николаев ДП, Павлова МА, and Тимофеев ВА // Информационные процессы. — 2021. — Vol. 21, no. 4. — P. 295–312.
 10. Cloud Shadows Detection and Compensation Algorithm on Multispectral Satellite Images for Agricultural Regions / Bocharov DA, Nikolaev DP, Pavlova MA, and Timofeev VA // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2022. — Vol. 67, no. 6. — P. 728–739.
 11. Guo Ruiqi, Dai Qieyun, Hoiem Derek. Paired regions for shadow detection and removal // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. — 2012. — Vol. 35, no. 12. — P. 2956–2967.
 12. Near real-time shadow detection and removal in aerial motion imagery application / Silva Guilherme F, Carneiro Grace B, Doth Ricardo, Amaral Leonardo A, and de Azevedo Dario FG // ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing. — 2018. — Vol. 140. — P. 104–121.
 13. Buchsbaum Gershon. A spatial processor model for object colour perception // Journal of the Franklin institute. — 1980. — Vol. 310, no. 1. — P. 1–26.
 14. Shadow Detection and Compensation from Remote Sensing Images under Complex Urban Conditions / Zhou Tingting, Fu Haoyang, Sun Chenglin, and Wang Shenghan // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13, no. 4. — P. 699.
 15. Mostafa Yasser, Abdelhafiz Ahmed. Accurate shadow detection from high-resolution satellite images // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2017. — Vol. 14, no. 4. — P. 494–498.
 16. Glasbey Chris A. An analysis of histogram-based thresholding algorithms // CVGIP: Graphical models and image processing. — 1993. — Vol. 55, no. 6. — P. 532–537.

Использование плотного стереосопоставления и эффекта цветового виньетирования для улучшения качества преобразования цветовых координат

Шепелев Л.В.^{1,2}, Чумаченко А.С.^{1,2}, Ермаков И.А.^{1,2}, Шепелев Д.А.¹

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия,

² Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия
shepelev.lv@phystech.edu

Аннотация В работе предложен метод перехода из цветового пространства камеры в пространство стандартного наблюдателя, используя цветное виньетирование и стереофотографирование, с помощью плотным сопоставлением. Цветовое виньетирование может быть представлено как радиально-симметричные искажения спектральных чувствительностей сенсора. Идея метода заключается в увеличении числа каналов камеры за счет стереосопоставления пикселей с разными параметрами цветового виньетирования. В работе рассматриваются различные алгоритмы плотного стереосопоставления, основанные на использовании глубоких нейронных сетей с открытым исходным кодом. Производится их обучение и сравнение их точностных характеристик на датасете KITTI 2012.

Ключевые слова: Цвет, цветное виньетирование, цветовая коррекция, стереосопоставление, KITTI 2012.

1 Введение

В данной работе мы рассматриваем проблему преобразования цветовых координат камеры в координаты стандартного наблюдателя. Рассматриваемая задача является крайне актуальной среди производителей цифровых камер и современных мобильных телефонов. Действительно, камера для многих пользователей является едва ли не самой главной частью телефона, а качество фотографий – параметром, по которому покупатели выбирают смартфоны. Требования пользователей только растут, поэтому необходимы новые подходы в обработке фотографий для улучшения качества цветовой репродукции. Заметим также, что большинство современных мобильных устройств обладают немаленькими блоками камер, состоящими из двух, трех или более камер, а также весьма мощными процессорами, способными на сложные вычисления с фотографиями. Следовательно, устройства уже сейчас могут делать стерео фотографии и осуществлять их обработку.

Согласно условию Максвелла-Лютера-Айвза [1], сенсор является колориметрическим, если его чувствительности линейно связаны с функциями цве-

товых соответствий стандартного наблюдателя CIE XYZ. Обычно на практике такого линейного преобразования не существует (см. Рис. 1), поэтому в качестве линейного преобразования выбирают такое, которое минимизирует цветовые различия на некотором наборе данных [2].

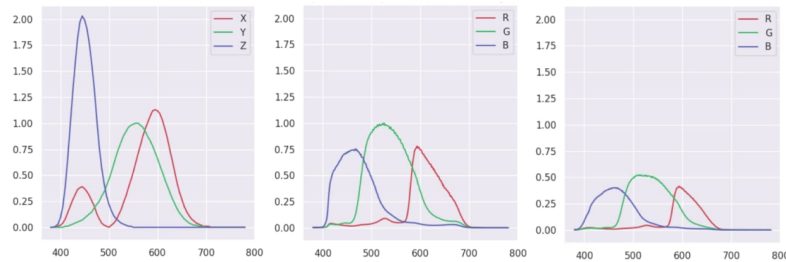


Рис. 1: Графики функций цветового соответствия стандартного наблюдателя и графики чувствительностей центрального и периферического пикселей камеры

Для улучшения точности цветовой репродукции при таком подходе, можно увеличивать размерность пространства сенсора камеры, например, сопоставляя снимки с нескольких камер телефона, при условии что они обладают разными существенными спектральными характеристиками. С другой стороны, если сенсоры камер схожи, то для обогащения цветовой информации для каждого пикселя, можно использовать вариативность спектральных характеристик в каждом пикселе самого сенсора, которое бывает при цветовом виньетировании.

Цветовое виньетирование может быть представлено как радиально симметричные искажения спектральных чувствительностей сенсора. Решение, которое мы предлагаем, использует этот эффект для расширения цветовой информации необработанного изображения, для улучшения точности перехода в стандартное цветовое пространство.

Ранее в нашей работе [3] было показано, что использование эффекта цветового виньетирования, позволяет существенно улучшить качество перехода в стандартное цветовое пространство. Вопрос, который не был рассмотрен ранее, – это каким образом можно этот эффект использовать на практике. В данной работе предлагается использовать этот эффект в стереосистемах.

Зная карту диспаратности между стереоизображениями, можно собрать изображение виртуальной шестиканальной камеры, и используя эффект цветового виньетирования, можно увеличить число каналов, что как было показано в работе [3] уменьшит ошибку цветовой репродукции.

Для создания такой виртуальной камеры можно использовать алгоритмы стереосопоставления. Суть сопоставления заключается в получении кар-

ты диспаратности, которая для каждого пикселя одной фотографии показывает положение этого пикселя на другой фотографии.

В данной работе мы исследуем точностные характеристики различных нейросетевых алгоритмов плотного стереосопоставления, исходный код которых есть в открытом доступе.

Работа состоит из следующих частей. Сначала мы описываем эффект цветового виньетирования и результаты экспериментов по переходу в цветовые координаты стандартного наблюдателя. Затем мы рассматриваем различные алгоритмы стереосопоставления и исследуем их точностные характеристики.

2 Использование цветового виньетирования в цветовой репродукции

2.1 Описание эффекта цветового виньетирования

В отличие от обычного виньетирования, широко известного и описываемого законом косинуса четвертой степени [4], цветовое виньетирование является более сложным эффектом и характерно в основном для камер мобильных телефонов. Оно заключается в зависимости спектрального состава излучения от координат сенсоров на матрице камеры. Выделяют две причины возникновения этого эффекта:

1. В камерах мобильных телефонов все элементы оптической системы расположены максимально плотно, поэтому инфракрасный фильтр и светочувствительная матрица расположены очень близко друг к другу. Соответственно, длина хода лучей, проходящих инфракрасный светофильтр под разными углами к оптической оси камеры, значительно отличается (в отличие от камер с полноразмерными объективами). За счет большой разницы хода лучей близкий к инфракрасной области спектр излучения подавляется в разной степени: чем больше излучение проходит расстояния сквозь фильтр, тем сильнее подавляется его спектр в красной области.
2. Из-за небольшого размера матрицы камеры мобильного телефона светочувствительные элементы матрицы камеры улавливают в значительной мере меньше фотонов света, что приводит к существенному повышению шума на изображениях. Чтобы решить эту проблему, матрица мобильного телефона покрывается массивом микролинз. Недостатком этого решения является то, что, преломляя падающее излучение, микролинза работает аналогичным призме Ньютона образом, преломляя излучение на разных длинах волн по-разному. В результате часть излучения определенной длины волны не попадает на светочувствительную часть пикселя матрицы.

2.2 Переход в цветовое пространство стандартного наблюдателя

Опишем переход в пространство стандартного наблюдателя. Пусть C - матрица $6 \times w$ состоящая из спектральных чувствительностей двух камер, X - матрица $3 \times w$ состоящая из спектральных чувствительностей глаза человека, A - матрица преобразования 3×6 , то матрицу X находим из C с помощью линейного преобразования. Зная матрицы X и C , с помощью метода наименьших квадратов можно найти матрицу преобразования A

$$A = X C^T (C C^T)^{-1}. \quad (1)$$

В работе [3] экспериментально показано, что использование 6 каналов, составленных из чувствительностей камеры в центре и на периферии, уменьшило угловую ошибку в 3 раза по сравнению с трехканальной камерой, а именно средняя ошибка цветовой мишени упала с 0.61° до 0.21° .

Для составления из стереоизображений виртуальной шестиканальной камеры предлагается использовать алгоритмы плотного стереосопоставления.

3 Стереосопоставление

3.1 Описание процесса стереосопоставления

Цель стереосопоставления – получение карты диспаратности, состоящей из относительного смещения объектов на фотографиях. Другими словами, для каждого пикселя на левой фотографии в карте диспаратности хранится смещение этого пикселя по горизонтальной оси до его положения на правой фотографии. Предполагается, что камеры находятся на одной горизонтали, а сцена статична. Таким образом, для каждого пикселя на сцене, за исключением граничных, мы знаем, где они находятся на левой и правой фотографиях, если мы получили карту диспаратности. Практическое значение диспаратности и процесс получения стереофотографии изображены на Рис. 2.

3.2 Исследуемые алгоритмы

Для получения качественных карт диспаратности можно использовать глубокие нейронные сети, мы работали со следующими сетками: LEAStereo [5], ACVNet [6], CFNet [7], PSMNet [8]. В работе мы провели анализ алгоритмов плотного стереосопоставления на основе датасета KITTI 2012 [9], который состоит из 194 фотографий и карт диспаратности, собранных с помощью лазерных дальномеров. Мы взяли несколько нейронных сетей, обучали их и тестировали на данном датасете. Нейронные сети брали на вход левую и правую фотографии и выдавали карту диспаратности. Для оценки качества этих карт мы сравнивали их с истинными картами с помощью метрики L_1 , а

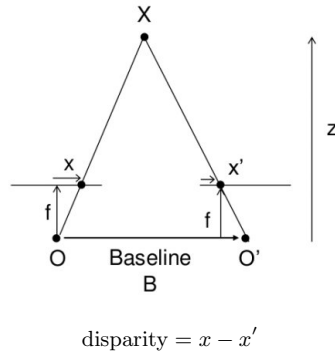


Рис. 2: Иллюстрация получения стереофотографий.

именно считали процент плохих пикселей в карте. Пиксель карты диспаратности считается плохим, если отличается по значению более чем на 3 единицы от соответствующего пикселя истинной карты. Для визуальной оценки качества мы проводили следующую операцию: брали левую фотографию, применяли к ней полученную карту диспаратности и получали правую восстановленную картинку. Затем легко сравнить правую истинную и правую восстановленную.

3.3 Результаты

Результаты представлены в таблице 1. Согласно полученным результатам, LEAStereo [5] оказался лучшим из протестированных алгоритмов среднее значение метрики на валидационной части датасета получилось 0.62%. Часть нейронных сетей, а именно PSMNet [8] и CFNet [7], не удалось полностью обучить из-за больших требований по памяти и, соответственно, проверить их на валидационной части датасета.

Рис. 3 подтверждают хорошую точность алгоритма, карты диспаратности получаются высокого качества, что позволяет из двух трехканальных камер получить шестиканальное изображение.

Таблица 1: Среднее расстояние между предсказанной и истинной картами диспаратности

Architecture	All KITTI 2012	Validation part of KITTI2012
LEAStereo	0.49%	0.62%
ACVNet	20.7%	21.9%
PSMNet	0.19%	–
CFNet	0.33%	–



(a) Левое изображение



(b) Правое изображение



(c) Правое изображение, восстановленное из левого (LEAStereo)



(d) Вычисленная карта диспаратности (LEAStereo)

Рис. 3: Результаты вычисления карты диспаратности

4 Обсуждение

Используя исследованные в данной работе алгоритмы плотного стереосоставления и учитывая эффект цветового виньетирования, в дальнейшем можно будет проверить, насколько сильно улучшится точность цветовой репродукции при использовании данного метода.

Карты диспаратности получаются плотными: 99.4% пикселей совмещаются, и получаются шестиканальные суперпиксели, правда это относится

к пикселям не на краях. Чисто по физическим причинам, невозможно стереосопоставление фотографий по одному из двух краёв. Таких пикселей получается около 5% от всех. В итоге, как минимум для 94-95% пикселей на фотографии мы можем корректно проводить стереосопоставление и, используя эффект цветового виньетирования, совершать преобразования цветовых координат.

Оставшиеся же 5-6% в основном краевых пикселей, для которых не удастся провести операцию сопоставления, останутся хорошей темой для дальнейших исследований и экспериментов.

Кроме того, в работе [3] были проведены эксперименты для спектральных чувствительностей в центре и на периферии, где различие между чувствительностями максимально. Однако на практике различие в чувствительностях между сопоставленными пикселями может быть не таким сильным, что поэтому уменьшение ошибки цветовой репродукции для каждого пикселя может сильно различаться. В дальнейшем также планируется это проверить.

5 Заключение

В работе приведено общее описание процессов плотного стереосопоставления и эффекта цветового виньетирования. Были протестированы современные нейронные сети, выполняющие задачу плотного стереосопоставления на основе датасета KITTI 2012. Был приведен метод улучшения качества перехода из собственного цветового пространства камеры в пространство стандартного наблюдателя (CIE XYZ), в основе которого лежит композиция плотного стереосопоставления и цветового виньетирования. Хорошее качество полученных карт диспаратности дает большие надежды на успех предложенного подхода. В будущем мы планируем продолжить исследования, а именно: реализовать алгоритм преобразования цветовых координат, потестировать его на датасете из сырых изображений, сравнить с существующими методами преобразования координат, исследовать проблему с краевыми пикселями.

Список литературы

- [1] R Von Luther. “Aus dem gebiet der farbreizmetrik”. In: *Zeitschrift fur Technische Physik* 12 (1927), pp. 540–558.
- [2] Hakki Can Karaimer and Michael S Brown. “Improving color reproduction accuracy on cameras”. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018, pp. 6440–6449.
- [3] Арина Чумаченко et al. “Использование эффекта цветового виньетирования для повышения точности преобразования цветовых координат”. Russian. In: *ITuC 2021*. 2022.

- [4] Manoj Aggarwal, Hong Hua, and Narendra Ahuja. “On cosine-fourth and vignetting effects in real lenses”. In: *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001*. Vol. 1. IEEE. 2001, pp. 472–479.
- [5] Xuelian Cheng et al. “Hierarchical Neural Architecture Search for Deep Stereo Matching”. In: *NeurIPS 2020*. 2020.
- [6] Peng Guo Gangwei Xu Junda Cheng and Xin Yang. “Attention Concatenation Volume for Accurate and Efficient Stereo Matching”. In: *CVPR 2022*. 2022.
- [7] Yuchao Dai Zhibo Rao Zhelun Shen. “CFNet: Cascade and Fused Cost Volume for Robust Stereo Matching”. In: *CVPR 2021*. 2021.
- [8] Yong-Sheng Chen Jia-Ren Chang. “Pyramid Stereo Matching Network”. In: *CVPR 2018*. 2018.
- [9] Andreas Geiger, P Lenz, and R Urtasun. “Are we ready for autonomous driving”. In: *The KITTI Vision Benchmark Suite, 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3354–3361.

Исследование задачи цветовой константности для мультиспектрального случая с использованием априорной информации о свойствах отражения поверхности

Кущев Д.О.¹, Бочаров Д.А.², Сидорчук Д.С.²

¹ Московский физико-технический институт, Москва, Россия

² Институт проблем передачи информации,
Российская академия наук, Москва, Россия
kushchev.do@phystech.edu

Аннотация Работа посвящена исследованию влияния использования априорной информации о параметрах спектральных функций отражения поверхности на качество решения задачи цветовой константности. С использованием имитационных моделей мультиспектральных изображений исследуются алгоритмы оценки параметров источников освещения на основе переборной схемы в дискретных приближениях множества спектров с алгоритмами на основе случайного выбора параметров источника и фиксированного. Приведены результаты экспериментов, которые показывают, что стратегия на основе переборной схемы с использованием априорных приближений позволяет на порядки точнее оценить неизвестные параметры спектральной функции отражательной способности в смысле точности моделирования мультиспектрального изображения.

Ключевые слова: оценка спектра отражения, ключи цветовой константности, имитационное моделирование

1 Введение

Задача анализа мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли тесно связана с подходом т.н. точного земледелия, заключающегося в использовании современных информационных технологий для автоматизации процессов анализа и контроля состояний местностей сельскохозяйственного назначения и повышения эффективности управления [1]. С одной стороны, доступность бюджетных беспилотных летательных аппаратов упрощает сбор изображений местности, однако, с другой стороны, анализ получаемых данных может быть затруднён из-за искажений, вносимых сложными условиями освещения, например, закатным Солнцем. Данная проблема не стоит так остро для данных космического мониторинга, т.к. у таких активно используемых спутников как Sentinel-2 орбита является солнечно-синхронной, что значительно снижает вариативность условий освещения [2].

Методы компенсации искажений позволят эквализировать условия освещения для данных аэрофотосъёмки и спутникового мониторинга, а алгоритм сопоставления аэрофотоснимков географической местности [3] даст возможность пространственно сопоставить их со спутниковыми изображениями и тем самым обогатить набор данных для анализа. Это обосновывает актуальность задачи т.н. цветовой константности, которая сводится к определению по имеющемуся изображению параметров источника освещения с целью оценить параметры отражательной способности поверхности объектов в сцене.

Пусть \mathbf{I} – мультиспектральное изображение, состоящее из k каналов:

$$\mathbf{I} = (I_1, \dots, I_k). \quad (1)$$

Будем опираться на модель формирования изображения, в соответствии с которой \mathbf{I} определяется как интеграл по длине волны от произведения спектрального состава источника освещения $E(\lambda)$, функций спектральной чувствительности k -канального сенсора $\mathbf{R}(\lambda) = (R_1(\lambda), \dots, R_k(\lambda))$ и функции отражательной способности поверхности $S(\lambda)$:

$$\mathbf{I} = \int_0^\infty E(\lambda)S(\lambda)\mathbf{R}(\lambda)d\lambda. \quad (2)$$

Как известно, без ограничений, накладываемых на функции отражательной способности и спектральные характеристики источников освещения, эта задача не имеет точного решения [4]. Строго говоря, даже с известными ограничениями, задача является математически некорректно поставленной и в общем случае может быть решена только в смысле некоего приближения.

В работе Л. Малоуни и Б. Уонделла [5] задача оценки спектра отражения ставится как поиск функций отражательной способности при известных параметрах освещения, а ее решение сводится к решению системы линейных уравнений относительно параметров отражения. В работе [5] функции отражательной способности и спектров освещения моделируются как линейные комбинации известных базисных спектров. Данная модель в нашей задаче была выбрана в качестве опорной. Среди известных в литературе решений задачи оценки спектра отражения можно выделить обобщения классических алгоритмов gray-world [6], max-RGB [7], shades of gray [8] и gray edge [9] для мультиспектрального случая. Эти методы основаны на выдвижении и использовании некоторых предположениях о сцене, с помощью которых можно получить информацию об источниках.

Один из распространённых подходов к решению задачи цветовой константности опирается на использовании информации о т.н. ключах – объектах в сцене, для которых характерные значения спектральной функции отражения можно считать известными с некоторой точностью и с помощью которых можно аппроксимировать неизвестные параметры в модели (2). Так, например, в работе Бианко и соавторов [10] предлагается оценивать параметры освещения с использованием детектированных лиц на изображении в качестве ключей.

В данной работе рассматривается постановка задачи оценки неизвестных параметров отражательной способности с использованием синтетических моделей мультиспектральных изображений единичной площади. Функции чувствительности сенсора $(R_1(\lambda), \dots, R_k(\lambda))$ будем приближать δ -функциями. Тогда интенсивность изображения в ξ -ом канале есть произведение спектров освещения, отражательной способности и чувствительности ξ -го канала сенсора:

$$I_\xi = E \cdot S \cdot R_\xi. \quad (3)$$

В данной работе мы использовали синтетические мультиспектральные изображения, полученные с использованием открытых баз спектров отражательной способности, функций чувствительности сенсоров и модели прямого источника освещения. С использованием модельных изображений были исследованы разные стратегии определения параметров освещения для оценки неизвестных параметров отражательной способности. Показано, что переборная схема в аппроксимациях множеств спектров освещения и отражательной способности, известной из ключа цветовой константности, позволяет с значительно меньшей ошибкой оценить параметры неизвестной поверхности, чем стратегии, основанные на случайном выборе параметров источника и его приближении фиксированным.

2 Постановка задачи

Пусть нам даны два мультиспектральных изображения $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$, согласованные с моделью (3), и такие, что:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1(\lambda) &= E(\lambda)\mathbf{R}(\lambda)S_{clue}(\lambda), \\ \mathbf{I}_2(\lambda) &= E(\lambda)\mathbf{R}(\lambda)S(\lambda), \\ \lambda \in \mathbb{L}, S_{clue} &\in \mathbb{S}_{clue}^{\dim \mathbb{L}}, E \in \mathbb{E}^{\dim \mathbb{L}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где известно, что $E(\lambda)$ принадлежит некоторому семейству спектров дневного и вечернего освещения \mathbb{E} , а λ принадлежит множеству значений длин волн, для которых определены функции чувствительности сенсоров. Считается, что функция спектральной отражательной способности S_{clue} является ключом цветовой константности, т.е. существует априорное предположение о принадлежности S_{clue} некоторому известному множеству спектров \mathbb{S}_{clue} , значительно меньшему, чем множество всех возможных.

Требуется, располагая $\mathbf{I}_1(\lambda), \mathbf{I}_2(\lambda) \forall \lambda \in \mathbb{L}$ и учитывая априорную информацию о \mathbb{E} и \mathbb{S}_{clue} , оценить S .

3 Решение задачи

Метод решения задачи состоит из двух стадий: оценки параметров освещения \hat{E} по \mathbf{I}_1 и оценка отражательной способности \hat{S} с использованием \hat{E} . Опишем далее данные стадии подробнее.

3.1 Оценка параметров освещения

На первой стадии приближенно восстанавливается спектр источника освещения по априорной информации (извлеченной из ключа цветовой константности) и значению отраженного сигнала в данной области, зарегистрированному спутниковым сенсором. Оптимальным результатом работы данной стадии будем считать такие параметры спектра освещения \hat{E} , при которых минимизируется ошибка моделирования мультиспектрального изображения. Обозначим процесс моделирования \mathbf{I} через функцию $F(E, \mathbf{R}, S) = \mathbf{I}$. Тогда искомое значение \hat{E} будем искать через решение следующей оптимизационной задачи:

$$\hat{E}, \hat{S}_1 = \underset{E^* \in \mathbb{E}, S^* \in \mathbb{S}_{clue}}{\operatorname{arg\,min}} \|\mathbf{I}_1 - F(E^*, \mathbf{R}, S^*)\|_2. \quad (5)$$

В общем случае задача (5) невыпуклая, поэтому предлагается использовать переборную схему в дискретных аппроксимациях \mathbb{E} и \mathbb{S}_{clue} .

3.2 Оценка параметров отражательной способности

На второй стадии алгоритма для всех пикселей анализируемой области находятся значения спектра отражательной способности методом поканальной нормализации, считая спектр освещения точно найденным на первой стадии.

$$\hat{S}(\lambda) = \frac{\mathbf{I}_2(\lambda)}{\hat{E}(\lambda)\mathbf{R}(\lambda)}, \forall \lambda \in \mathbb{L} \quad (6)$$

4 Эксперименты

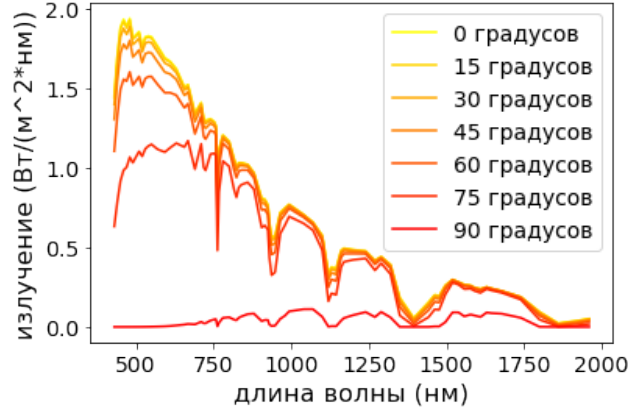
Целью эксперимента является получение зависимостей показателей качества алгоритмов оценки параметров отражательной способности S от характеристик источника освещения, в которых параметры освещения выбираются полной переборной схемой, случайно либо считаются фиксированными. В качестве параметров фиксированного источника был взят спектр дневного освещения с Солнцем, находящимся в зените.

Сравнение данных алгоритмов с обобщениями методов gray-world, max-RGB, shades of gray и gray edge в данной работе не предусмотрено, т.к. в текущей работе рассматриваются синтетические однопиксельные мультиспектральные изображения, в то время как известные в литературе рассчитаны на реальные (либо синтетические, но приближенные к реальным) изображения, обладающие пространственным разрешением.

4.1 Методика

Данные о семействе спектров дневного освещения были получены с помощью спектральной модели [11] изменением угла наклона Солнца относительно зенита. Спектры Солнца, визуализированные при некоторых углах представлены на рисунке 1.

Рис. 1: Спектры прямого источника освещения в зависимости от угла Солнца с зенитом.



В качестве данных отражательной способности известного множества спектров \mathbb{S}_{clue} использовалась база данных Base Spectra (splib07a) [12] для вегетирующих культур, таких как сухая трава, газонная трава, пастбища. Чувствительности сенсоров спутников на различных длинах волн взяты с сайта USGS [13]. Коэффициент отражения некоторых поверхностей и чувствительность сенсоров для спутников *LandsatOLI8* и *EarthObserving1* продемонстрированы на рисунке 2 для нашего рассматриваемого дискретного спектра длин волн.

Выберем множество из \mathbb{S}_{clue} , множество из \mathbb{E} и спутник, с которого были получены сгенерированные данные. На выбранных параметрах будем проводить эксперимент $n = 10^5$ раз для каждого метода оценки отражательной способности. На каждой итерации генерируем мультиспектральные пиксели по модели (4), где $S \notin \mathbb{S}_{clue}$. Ошибкой будем считать величину спектральной нормы отклонения полученной матрицы отражательной способности от её истинных значений, усредненной по n итерациям:

$$\epsilon = 1/n \sum_{i=0}^{n-1} \|S_i - \hat{S}_i\|_2. \quad (7)$$

4.2 Результаты

Были проведены эксперименты по оценке качества предложенного алгоритма на данных имитационного моделирования. Сравнивался предложенный алгоритм с подобными, в которых выбор параметров освещения осуществлялся случайным образом или всегда оставался неизменным. Были получены результаты зависимости средней ошибки для каждого метода от истинного угла наклона источника освещения.

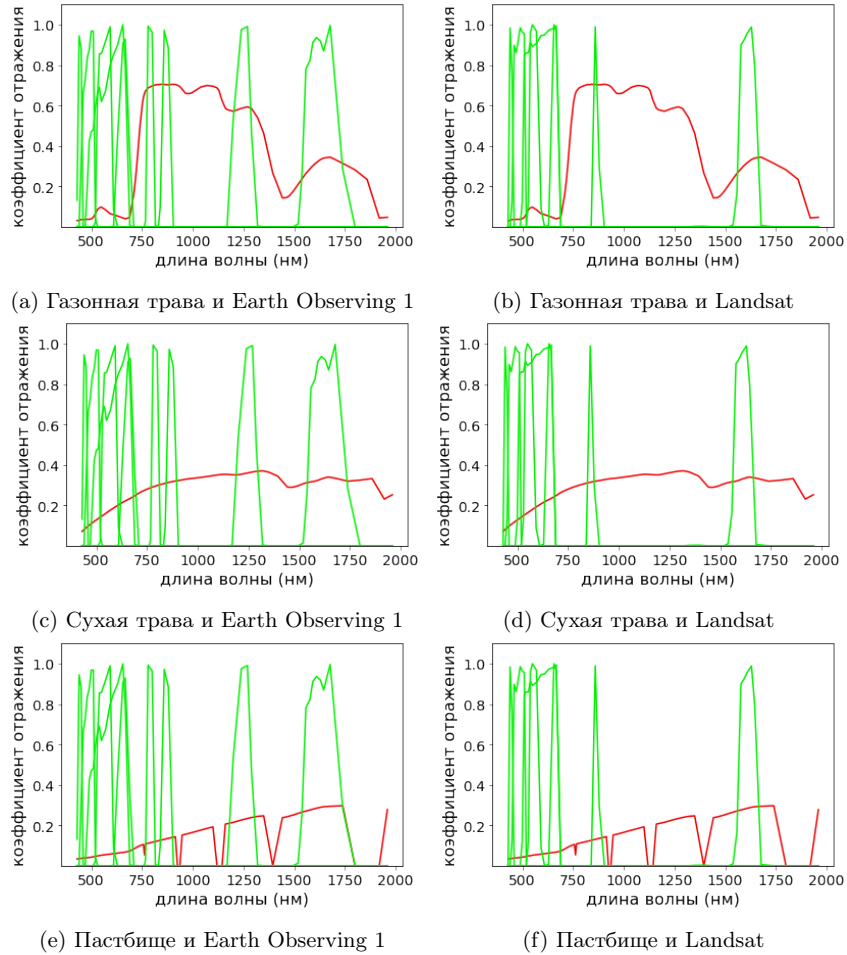


Рис. 2: Коэффициенты отражения (красные) и чувствительности сенсоров спутника (зелёный).

Из полученных результатов можно сделать вывод, что ошибка у предложенного алгоритма на порядки меньше, чем у других алгоритмов: почти 0 (а именно – 10^{-16}), в то время как для случайного выбора ошибка составляет до 3.0, а для фиксированного – до 1.5.

Также был рассмотрен аналогичный эксперимент, в котором максимальный возможный угол наклона источника был ограничен 80 градусами, т.е. близкие к закатному Солнцу спектры источника были исключены из возможных. Если сравнить величины ошибок с рисунков 3 и 4, то можно ви-

Рис. 3: Зависимость средней ошибки ϵ от истинного угла наклона источника освещения с зенитом.

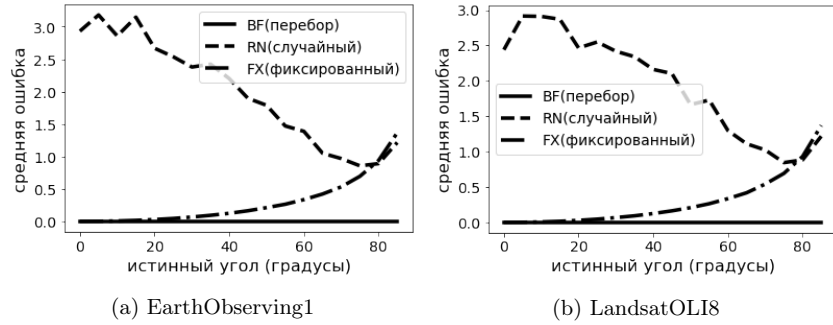
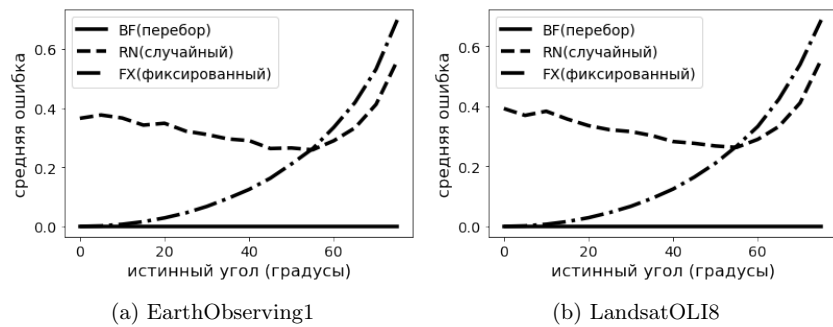


Рис. 4: Зависимость средней ошибки ϵ от истинного угла наклона источника освещения с зенитом, ограниченным 80 градусами.



деть, что средняя ошибка при случайном выборе параметров источника снижается почти в 5 раз. Это происходит из-за того, что спектры источника (рисунок 1) при небольших отклонениях от зенита отличаются не так существенно, однако при стремлении к 90 градусам (закат), разница в спектрах значительно растёт.

Из приведённых экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Использование предположений о возможных параметрах освещения и спектральных функций отражения может быть эффективно использовано для оценки неизвестных параметров;
2. В условиях небольших отклонений Солнца от зенита стратегия приближения неизвестного источника через фиксированный оказывается более эффективной, чем через выбор случайного.

5 Заключение

В работе исследована задача вычисления спектра отражения для мультиспектрального случая. Приведены эксперименты по исследованию качества оценки функции отражательной способности с использованием априорной информации о ключах цветовой константности, для которых известно приближение множества возможных спектров. С использованием имитационных моделей мультиспектрального изображения показано, что с алгоритм на основе переборной схемы позволяет на порядки точнее оценить параметры отражательной способности в сравнении со случайным выбором параметров источника освещения и фиксированным, соответствующим Солнцу в зените. Величина ошибки растёт при стремлении к закатному Солнцу, где наблюдается наибольшая разница в качестве у исследованных алгоритмов.

Не смотря на простоту и наивность переборной схемы, она имеет практический потенциал использования в более близких к практике задачах. Так, множество спектров источника освещения может быть приближено наиболее часто встречающимися спектрами освещения, а априорная информация о ключах цветовой константности может быть извлечена автоматическим образом, например, путём локализации отдельно стоящих объектов на аэрофотоснимках (например, строения [14]) или области полей с вегетирующими культурами [15]. Данные результаты могут быть использованы в дальнейшем в исследованиях задачи оценки спектра отражения на реальных данных дистанционного зондирования Земли.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №20-61-47089).

Список литературы

1. Rajendra P Sishodia, Ram L Ray, and Sudhir K Singh. Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19):3136, 2020.
2. Matthias Drusch, Umberto Del Bello, Sébastien Carlier, Olivier Colin, Veronica Fernandez, Ferran Gascon, Bianca Hoersch, Claudia Isola, Paolo Laberinti, Philippe Martimort, et al. Sentinel-2: Esa's optical high-resolution mission for gmes operational services. *Remote sensing of Environment*, 120:25–36, 2012.
3. Irina Andreevna Kunina, Lev Mikhaylovich Teplyakov, Andrey Pavlovich Gladkov, Timur Maratovich Khanipov, and Dmitry Petrovich Nikolaev. Aerial images visual localization on a vector map using color-texture segmentation. In Dmitry Nikolaev Jianhong Zhou Antanas Verikas, Petia Radeva, editor, *ICMV 2017*, volume 10696, pages 106961T1–106961T8, Bellingham, Washington 98227-0010 USA, Apr. 2018. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). DOI: 10.1117/12.2310138.
4. Haris Ahmad Khan, Jean-Baptiste Thomas, Jon Yngve Hardeberg, and Olivier Laligant. Illuminant estimation in multispectral imaging. *JOSA A*, 34(7):1085–1098, 2017.
5. Laurence T Maloney and Brian A Wandell. Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance. *JOSA A*, 3(1):29–33, 1986.

6. Gershon Buchsbaum. A spatial processor model for object colour perception. *Journal of the Franklin institute*, 310(1):1–26, 1980.
7. Edwin H Land and John J McCann. Lightness and retinex theory. *Josa*, 61(1):1–11, 1971.
8. Graham D Finlayson and Elisabetta Trezzi. Shades of gray and colour constancy. In *Color and Imaging Conference*, volume 2004, pages 37–41. Society for Imaging Science and Technology, 2004.
9. Joost Van De Weijer, Theo Gevers, and Arjan Gijsenij. Edge-based color constancy. *IEEE Transactions on image processing*, 16(9):2207–2214, 2007.
10. Simone Bianco and Raimondo Schettini. Color constancy using faces. In *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 65–72. IEEE, 2012.
11. Richard E Bird and Carol Riordan. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth’s surface for cloudless atmospheres. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 25(1):87–97, 1986.
12. RF Kokaly, RN Clark, GA Swayze, KE Livo, TM Hoefen, NC Pearson, RA Wise, WM Benzel, HA Lowers, RL Driscoll, et al. Usgs spectral library version 7 data: Us geological survey data release. *United States Geological Survey (USGS): Reston, VA, USA*, 2017.
13. USGS. Spectral characteristics viewer. <https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer>. Accessed: 11-08-2022.
14. Л. М. Тепляков, А. С. Григорьев, И. А. Кунина, and С. А. Гладилин. Апробация подхода к распознаванию объектов, заданных формальным описанием наблюдаемых свойств, на примере задачи поиска отдельных строений на аэрофотоснимках. *Сенсорные системы*, 32(3):260–268, 2018. DOI: 10.1134/S0235009218030125.
15. Валерий Андреевич Тимофеев, М. А. Павлова, А. А. Смагина, and Д. А. Бочаров. Сегментация полей на спутниковых снимках sentinel-2 с использованием исторических данных вегетационных индексов. In *ИТuС 2021. -*, 2022.

О методах восстановления гиперспектральных изображений по трёхканальным с нулевой цветовой ошибкой

Владимиров Даниил^{1,2}, Ершов Егор¹, Реутский Даниил^{1,2}

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия,

² Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия
vladimirov.dm@phystech.edu

Аннотация В работе обсуждается вопрос восстановления спектров по трехканальным откликам стандартных цветковых камер. Рассмотрены алгоритмы спектральной реконструкции и их модификации, позволяющие обнулить цветовую ошибку. Идея, позволяющая избежать возникновения цветовой ошибки заключается в выделении ядра преобразования, применяемого к спектральной картине для получения трехканального изображения. Благодаря этому восстанавливаемый спектр раскладывается на две компоненты, одна из которых считается аналитически, и появляется возможность восстанавливать спектры, которые являются метамерами данного цвета. Также такой подход к спектральной реконструкции позволяет алгоритмам быть более устойчивыми к изменению освещенности в картине. В результате работы был проверен и подтвержден метод, позволяющий обнулить цветовую ошибку с точностью спектрального восстановления 3.75 градуса, что согласуется с современными научными результатами.

Ключевые слова: гиперспектральная реконструкция, нулевая цветовая ошибка, нейросетевая реконструкция.

1 Введение

Цель гиперспектральной реконструкции — максимально точно восстановить спектр, отражаемый или испускаемый объектами в сцене. Знание значений спектров в отдельно взятых пикселях изображения позволяет определить физические свойства соответствующего объекта. Знание спектральных характеристик в сцене используется в медицине, геологии, агропромышленности и дистанционном распознавании цветов.

Существующие алгоритмы спектральной реконструкции, как нейросетевые так и не использующие глубокое обучение, позволяют восстанавливать спектр с хорошей точностью, например HSCNN-R [3] или A+ [1], SOTA и алгоритм, повторивший результаты SOTA соответственно, однако, большинство из них объединяет одна проблема: они не обеспечивают нулевую цветовую ошибку. Пример работы существующих алгоритмов показан на рисунке 1. Одним из исключений является работа [2], верификация результатов которой и является основной задачей данной работы.

Нами было предложено два подхода для проверки и достижения результатов, описанных в [2]:

- линейная модель;
- нейросетевые алгоритмы.

В данной работе проверена идея, позволяющая получить нулевую цветовую ошибку. Идея описана и предложена в [2].

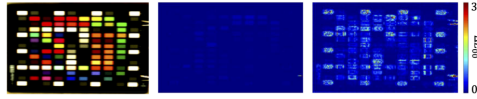


Рис. 1. Левая картинка — Color checkers — исходная RGB картинка. Средняя картинка — результат работы полиномиальной регрессии. Правая картинка — результат работы HSCNN-R. Ошибка измеряется с помощью метрики ΔE_{00} . Иллюстрация взята из [2].

Рассматриваемые нейросетевые алгоритмы включают в себя: полносвязную нейронную сеть для улучшения результатов линейной модели и проверки идеи о сохранении восстановленного цвета, и сверточную нейронную сеть, основанную на HSCNN-R.

2 Достижение нулевой цветовой ошибки

В данном разделе будет описана идея, позволяющая избежать цветовой ошибки при восстановлении спектра.

Идея заключается в следующем: восстановленные спектры должны лежать во множестве метамеров данного цвета, то есть

$$P(\mathbf{S}, \boldsymbol{\rho}) = \{\mathbf{r} | \mathbf{S}^T \mathbf{r} = \boldsymbol{\rho}\}, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\rho}$ — вектор в RGB(трехканальном) пространстве, \mathbf{r} — вектор в спектральном пространстве, \mathbf{S} — матрица спектральной чувствительности камеры.

\mathbf{S} — матрица размера $n \times 3$, и так как это матрица спектральной чувствительности камеры, то ее столбцы линейно независимы, значит их можно выделить как базис 3-мерного подпространства n -мерного спектрального пространства. Положим \mathbf{B} матрицей размера $n \times (n - 3)$, составленной из базисных векторов в $(n - 3)$ -мерном подпространстве n -мерного спектрального пространства. Тогда любой вектор в спектральном пространстве можно разложить на две компоненты, одна лежит в $\text{span}(\mathbf{S})$, другая в $\text{span}(\mathbf{B})$:

$$\mathbf{r} = \mathbf{P}^S \mathbf{r} + \mathbf{P}^B \mathbf{r}, \quad (2)$$

где

$$\mathbf{P}^S = \mathbf{S}(\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T, \mathbf{P}^B = \mathbf{E} - \mathbf{P}^S \quad (3)$$

В силу того, что \mathbf{S} имеет ранг 3, \mathbf{P}^S также имеет ранг 3, значит \mathbf{P}^B имеет ранг $(n - 3)$. Базис в $\text{span}(\mathbf{B})$ может быть найден путем ортогонализации векторов \mathbf{P}^B .

Таким образом, множество метамеров данного цвета описывается следующим образом:

$$P(\mathbf{S}, \boldsymbol{\rho}) = \{\mathbf{S}(\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \boldsymbol{\rho} + \mathbf{B}\mathbf{b} | \mathbf{b} \in \mathbb{R}^{n-3}\}. \quad (4)$$

Проекция спектра в подпространстве $\text{span}(\mathbf{S})$ будем называть фундаментальными метамерами, а проекции в $\text{span}(\mathbf{B})$ черными метамерами (вектора из ядра преобразования).

Ошибка восстановления спектра может быть записана как норма разности между восстановленным и реальным спектрами:

$$\text{ошибка восстановления} = \|\mathbf{r} - \boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{\rho})\|, \quad (5)$$

где \mathbf{r} – реальный спектр, $\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{\rho})$ – результат реконструкции.

Учитывая, что фундаментальные метамеры считаются аналитически, нужно восстановить только черные метамеры, то есть выражение (5) примет вид:

$$\text{ошибка восстановления} = \|\mathbf{r}_b - \boldsymbol{\Psi}_b(\boldsymbol{\rho})\|. \quad (6)$$

3 Реконструкция спектра, как задача регрессии

Задача регрессии формулируется следующим образом:

$$\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{M}\varphi(\boldsymbol{\rho}) \approx \mathbf{r}, \quad (7)$$

\mathbf{M} – регрессионная матрица, отображающая p -мерное пространство признаков в n -мерное пространство спектров, $\varphi : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^p$ – это отображение признаков для каждого алгоритма. Выражение (7) можно переформулировать, как задачу оптимизации в виде

$$\min_M \sum_i \| \mathbf{M}\varphi(\boldsymbol{\rho}_i) - \mathbf{r}_i \|^2. \quad (8)$$

3.1 Линейная модель

Линейность модели заключается в следующем: мы считаем, что признаки зависят линейно от вектора $\boldsymbol{\rho}$, то есть $\varphi(\boldsymbol{\rho}) = \boldsymbol{\rho}$. Полагая $\boldsymbol{\Psi}_b(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{M}_b \boldsymbol{\rho}$, и учитывая, что мы хотим ограничить восстановленные спектры только подпространством черных метамер, можно сказать, что $\mathbf{M}_b = \mathbf{B}\mathbf{A}$, тогда задача оптимизации ставится следующим образом:

$$\min_A \| \mathbf{B}\mathbf{A}\varphi(\boldsymbol{\rho}) - \mathbf{r}_b \|. \quad (9)$$

\mathbf{B} - ортогональная матрица, значит $\forall \mathbf{C} \rightarrow \|\mathbf{C}\| = \|\mathbf{B}^T \mathbf{C}\|$, тогда выражение (9) можно переписать в виде

$$\min_A \|BA\varphi(\rho) - \mathbf{r}_b\| = \min_A \|\mathbf{B}^T(BA\varphi(\rho) - \mathbf{r}_b)\| = \min_A \|A\varphi(\rho) - \mathbf{B}^T \mathbf{r}_b\|. \quad (10)$$

4 Полносвязная нейронная сеть

В нейросетевых алгоритмах $A\varphi(\rho)$ заменяется на выход сети, то есть $DNN(\rho) \approx \mathbf{B}^T \mathbf{r}_b \Leftrightarrow \Psi_b(\rho) = BDNN(\rho) \approx \mathbf{r}_b$.

В качестве архитектуры простой нейронной сети была выбрана полносвязная нейронная сеть с тремя скрытыми слоями по 64 нейрона каждый, с функцией активации ReLU на каждом и LeakyReLU в конце.

5 Сверточная сеть

В качестве архитектуры сверточной сети была выбрана сеть HSCNN-R с тремя блоками с остаточным обучением, представленная в [3].

К входному изображению применяется свертка с ядром 3×3 и страйдом 1. Этот результат прибавляется к выходу цепочки блоков с остаточным обучением. Схема одного блока представлена на рисунке 2. К полученному результату применяется ReLU и свертка.

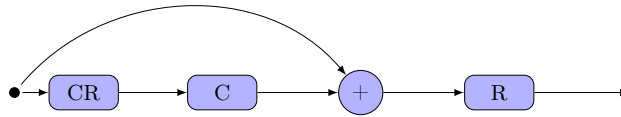


Рис. 2. Схема блока с остаточным обучением. C — означает свертку с ядром 3×3 и страйдом 1, R — ReLU.

6 Вычислительные эксперименты

6.1 Набор данных

В работе использовался набор данных NTIRE2020, который содержит 450 гиперспектральных изображений размером 482×512 . Значения спектров измерены в диапазоне от 400 до 700 нанометров, с шагом 10, то есть каждое изображение содержит 31 канал.

Для получения RGB изображений использовались спектральные чувствительности стандартного наблюдателя CIE1964.

6.2 Используемые метрики

- Среднеквадратичная ошибка:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - r'_i)^2, \quad (11)$$

$\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_n)$ – исходный спектр, $\mathbf{r}' = (r'_1, \dots, r'_n)$ – предсказанный спектр, n – количество каналов.

- Спектральная ошибка:

$$\alpha = \widehat{(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}. \quad (12)$$

- Цветовая ошибка: ΔE_{00} . Используется для оценки различия двух цветов: чем меньше значение, тем меньше цвета отличаются друг от друга.

6.3 Обучение моделей

Для обучения всех моделей и проверки их качества данные были разделены на два набора: тренировочный набор размером 360 картинок, и тестовый набор размером 90 картинок.

Полносвязная сеть. Сеть обучалась на картинках размера 121×124 , которые были получены из картинок тестового набора выбором каждого 16-ого пикселя. Размер батча 10. Ошибки на тестовом наборе считались уже на полноразмерных картинках.

В качестве функции потерь была выбрана сумма среднеквадратичных ошибок по каждому пикселю.

Сверточная сеть. Для обучения сверточной сети исходные картинки из тестового набора были разбиты на изображения размером 48×51 и загружались в сеть батчами размера 50. Ошибки на тестовом наборе считались на полноразмерных картинках.

В качестве функции потерь была выбрана сумма среднеквадратичных ошибок по каждому пикселю.

6.4 Результаты

Спектральная ошибка — угол, и цветовая ошибка — ΔE_{00} между восстановленным и реальным спектрами усреднялись по всем пикселям картинки. Результаты всех экспериментов представлены в таблице 1.

Полученный результат, позволяет сказать, что предложенный метод спектральной реконструкции позволяет избежать возникновения цветовой ошибки и добиться точности, сопоставимой с современными алгоритмами восстановления спектра.

Таблица 1. Результаты работы обученных алгоритмов, α - угол между векторами

	С разложением			Без разложения		
	спектрального пространства			спектрального пространства		
	угол	ΔE_{00}	MSE	угол	ΔE_{00}	MSE
LM	4.85	0.0	269305	4.85	0.0	269305
DNN	3.75	0.0	9513	3.90	42.05	9594

7 Заключение

В работе проверена идея, позволяющая обнулить цветовую ошибку в алгоритмах спектральной реконструкции. Выделение ядра преобразования, которым считается матрица спектральной чувствительности камеры, при реконструкции спектра позволяет избегать цветовой ошибки, слабо влияя на спектральные ошибки. На предложенных алгоритмах получилось достичь спектральной ошибки в 3.75 градуса, что является сопоставимым результатом с другими алгоритмами на данном наборе данных, и обнулить цветовую ошибку.

Предложение про повторяемость в других работах. Результат данной работы позволяет использовать, предложенную модификацию в различных алгоритмах спектральной реконструкции, зная какое значение ошибки нужно преодолеть.

В будущем планируется получить результаты на сверточной сети и проверить алгоритмы спектральной реконструкции, добившиеся state-of-the-art результата, а именно, HSCNN-R и A+, их работу с разложением спектрального пространства. И устойчивость модифицированных алгоритмов к изменению интенсивности в картине.

Список литературы

1. Jonas Aeschbacher, Jiqing Wu, and Radu Timofte. In defense of shallow learned spectral reconstruction from rgb images. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, pages 471–479, 2017.
2. Yi-Tun Lin and Graham D Finlayson. Physically plausible spectral reconstruction. *Sensors*, 20(21):6399, 2020.
3. Zhan Shi, Chang Chen, Zhiwei Xiong, Dong Liu, and Feng Wu. Hscnn+: Advanced cnn-based hyperspectral recovery from rgb images. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pages 939–947, 2018.

Сравнение известных методов спектрального переноса

Альмир Нурмухаметов¹, Дмитрий Сидорчук¹

¹ Институт проблем передачи информации, РАН, Большой Каретный пер., д. 19, стр. 1, Москва, 127051, Россия

Аннотация В работе рассматривается задача спектрального переноса данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в рамках которой по сигналу, зарегистрированному одним мультиспектральным сенсором, требуется оценить сигнал, который зарегистрировал бы второй сенсор, будь он на месте первого. К данному моменту было предложено несколько различных методов решения этой задачи. В нашей работе мы проанализировали, реализовали и протестировали их на одном и том же наборе данных. В проведенном эксперименте алгоритм Scheffler et al. [16] показал наилучшее качество.

Ключевые слова: спектральный перенос, дистанционное зондирование земли, гармонизация, Landsat-8, Sentinel-2.

1 Введение

Для обеспечения постоянного контроля изменения поверхности Земли необходимо использовать данные различных спутников. Так пара спутников Landsat-8, Sentinel-2, обладающих сенсорами со средним пространственным разрешением, позволяет обеспечить глобальное покрытие Планеты в среднем с периодом меньше трех дней [1]. Необходимость использования нескольких спутников обуславливается тем, что в некоторый период времени у нас может не быть данных с целевого сенсора (обычно это связано с временным интервалом или с плохими условиями съемки), но мы можем воспользоваться существующими данными с другого доступного сенсора, улучшив временной интервал мониторинга изменений. В таких задачах как разграничение полей на спутниковых снимках использование разновременных данных позволяет существенно улучшить качество [2]. С другой стороны использование двух мультиспектральных сенсоров одновременно позволяет получать данные с улучшенным пространственным разрешением – задача слияния [3]. Также в последнее время получила широкое распространение аэрофото-съемка, осуществляемая в том числе с дронов. В связи с этим значительно выросло разнообразие используемых сенсоров. Однако нельзя просто взять сигнал одного сенсора и использовать его вместо другого, так как функции спектральной чувствительности у разных сенсоров различаются (рис. 1). Игнорирование этих различий может породить проблемы при последующем использовании данных, например выход за допустимый диапазон значений вегетационного индекса [4]. Задача предсказания по изображению,

снятому одним мультиспектральным сенсором, изображения, которое было бы получено другим мультиспектральным сенсором с известными функциями чувствительности называется спектральным переносом (в англоязычной литературе *harmonization*).

Существует несколько вариантов постановки задачи спектрального переноса. В некоторых случаях задача пространственного масштабирования и задача спектрального переноса может решаться одновременно в рамках нейросетевого подхода [5]. В рамках другого варианта перенос необходимо произвести применительно к изображениям вегетационных индексов, предварительно вычисленных на основе поканальных значений [6]. В данной работе мы рассматриваем классический спектральный перенос: преобразование каналов одного сенсора в каналы другого сенсора независимо в каждом пикселе.

Чтобы подсчитать наиболее часто используемые индексы вегетации (NDVI, SAVI, EVI [7]) достаточно небольшого числа каналов: синий (B), зеленый (G), красный (R) и ближний инфракрасный (NIR). Функции спектральной чувствительности этих каналов в разных сенсорах схожи между собой, поэтому неплохие результаты могут быть достигнуты с помощью линейной модели [8]. В дальнейших исследованиях [9] заметили существование сильной зависимости от растительного покрова взаимоотношения R и NIR каналов. Данная зависимость не учитывается в линейной модели. При этом она может быть учтена при использовании $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ и $NDVI^2$ в качестве предикторов ([9], [10], [11]), что позволяет повысить качество переноса в местах с растительным покровом. Fan и Liu [12], рассмотрев пару сенсоров: Landsat Thematic Mapper и Earth Observing One Advanced Land Imager, обнаружили, что отношения значений их схожих каналов (*spectral band adjustment factor*, SBAF) зависит от NDVI нелинейно. Исходя из этого они предложили квадратичную модель предсказания SBAF по значениям NDVI. С точки зрения предсказания поканальных значений это означает использование в качестве предикторов произведений исходных каналов со значениями NDVI и $NDVI^2$. Обнаружив сильные отклонения данной модели при высоких значениях NDVI, Nadal et al. [13] предложили экспоненциальную модель предсказания SBAF.

В некоторых задачах интерес представляют специальные индексы, например RESI [14] и LAI [15]. Для расчета этих индексов необходимо использовать каналы, функции спектральной чувствительности которых у разных сенсоров различаются сильнее. В работе [16] для переноса таких каналов было предложено кластеризовать входные данные и использовать различные модели преобразования для разных спектральных кластеров входных данных.

Таким образом решения задачи спектрального переноса уже предложено несколько методов, но каждый из них тестировался на отдельном датасете и сравнивался только с линейным подходом. В данной работе предлагается сравнить следующие методы спектрального переноса [8], [12], [13], [16]. Для этого мы собрали собственный датасет на основе набора HLS (*Harmonized*

Landsat And Sentinel-2) [17]. Мы обучили методы на одинаковой подвыборке и сравнили их, определив плюсы и минусы каждого из подходов. Метод из работы [16] показал наилучшее качество в большинстве каналов и результат близкий с лучшими методами в остальных.

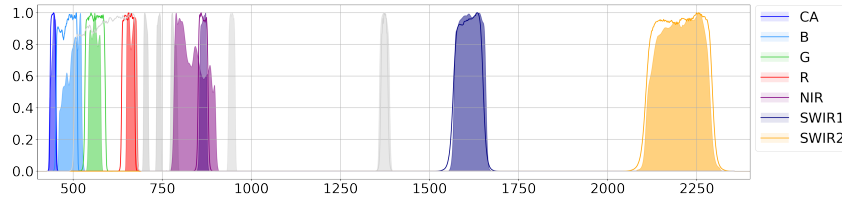


Рис. 1. Спектральные функции чувствительности Landsat-8 и Sentinel-2A. Контуром с заливкой отмечены функции Sentinel-2A. Контуром без заливки функции Landsat-8. Серым отмечены каналы, не включенные в рассмотрение.

2 Данные

Выбранные для сравнения работы [13], [16] используют синтетические данные для обучения, а тестируются и на синтетических, и на реальных данных. Авторы [16] для генерации синтетических данных используют данные аэрофотосъемки гиперспектральными (более ста каналов) сенсорами. Типы поверхностей включают горные породы, почвы, сельхозугодья, леса, городскую местность, пустыни. Для тестирования на реальных данных авторами был подготовлен собственный датасет. Данные Landsat и Sentinel были сопоставлены и скорректированы, полученный набор не был опубликован. Синтетические данные в работе [13] сгенерированы на основе спектров сельскохозяйственных участков, измеренных спектрофотометром у поверхности Земли. Тестирование на реальных данных в этой работе было выполнено на основе набора HLS [17] без указания выбранных дат.

В своей работе мы будем использовать реальные данные отражений, измеренные спутниковыми сенсорами. Для этого был скачан набор данных HLS [17], состоящий из изображений размера 3660×3660 пикселей, на которых выполнена атмосферная коррекция [18] и выровнены масштабы. Набор HLS предоставляет маски качества, с использованием которых из рассматриваемых изображений исключены облака, снег, вода и места высокой плотности аэрозоли. Также исключены тени от облаков, несмотря на существование алгоритмов, позволяющих компенсировать их эффект [20]. Такой подход позволяет оставить только спектральные различия между Sentinel-2A и Landsat-8.

Для обучения моделей были отобраны тайлы с полями: 15TUN, 37UDU, 38ULC и тайлы с разнообразными спектрами, но с доминированием расти-

тельности; 17SLS, 31UFS, 33UUQ, 33UUU. В свою очередь для тестирования моделей отобраны также два тайла с полями: 14TPT, 38ULB, и один тайл с разнообразными спектрами: 19TEN. В итоге получаем 7 изображений для обучения и 3 изображения для тестирования рассматриваемых методов.

Чтобы получить данные с высоким спектральным разнообразием и перейти от изображений к набору отдельных мультиспектральных пикселей мы воспользовались подходом Scheffler et al. [16]. Для этого каждое изображение было разделено на 50 кластеров, далее из каждого кластера случайным образом было выделено 2000 спектров Sentinel-2A и соответствующие им значения Landsat-8. После всех преобразований получаем следующий объем данных: 793272 и 297497 мультиспектральных пикселей в обучающей и тестовой выборках.

3 Эксперимент

Для оценки качества моделей будет использована столь популярная во многих работах ([5], [13], [16]) метрика RMSE, определяемая следующим образом отдельно для каждого канала:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N (\alpha_i^e - \alpha_i^t)^2}{N}}, \quad (1)$$

где N – количество пикселей в изображении, α_i^e – i -ое оцененное значение канала α , α_i^t – i -ое истинное измерение канала α .

Выборные для сравнения работы [13], [16] рассматривали задачу спектрального переноса из Landsat-8 в Sentinel-2A. Вслед за ними в нашей работе рассматривается именно этот переход.

4 Тестируемые методы

В качестве базового метода, относительно которого будут рассчитываться показатели и качество более сложных моделей, выберем метод без коррекции (No correction). Далее приводится краткое описание рассматриваемых моделей регрессии и SBAF:

1. *No correction* – для каждого канала целевого сенсора выбирается наиболее близкий по RMSE канал исходного, значения которого используются без изменений
2. *Linear* – линейное преобразование ближайшего по RMSE канала исходного сенсора (аналогично *No correction*):

$$\bar{\rho}_{\lambda,tar} = a \cdot \bar{\rho}_{\lambda,est} + b, \quad (2)$$

где $\bar{\rho}_{\lambda,tar}$ – значение предсказываемого канала λ , $\bar{\rho}_{\lambda,est}$ – значение соответствующего канала исходного сенсора.

3. *Multi Linear* – многомерная регрессия – предсказание каждого канала целевого сенсора по всем каналам исходного сенсора:

$$\bar{\rho}_{\lambda_j,tar} = \sum_i^n a_i \bar{\rho}_{\lambda_i,est} + b, \quad (3)$$

где n – количество каналов исходного сенсора, $\bar{\rho}_{\lambda_j,tar}$ – значение предсказываемого канала λ_j и $\bar{\rho}_{\lambda_i,est}$ – значение i -го канала исходного сенсора.

4. *Multi Linear Without Intercept* – версия без свободного коэффициента:

$$\bar{\rho}_{\lambda_j,tar} = \sum_i^n a_i \bar{\rho}_{\lambda_i,est}. \quad (4)$$

5. *MR1 Nadal* – модель Nadal et al. [13] с вовлечением NDVI, NDVI²:

$$\bar{\rho}_{(red,nir),tar} = \beta_1 \bar{\rho}_{red,est} + \beta_2 \bar{\rho}_{nir,est} + \beta_3 NDVI + \beta_4 NDVI^2. \quad (5)$$

6. *MR2 Nadal* – модель Nadal et al. с многочленом второго порядка и двойным произведением:

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_{(g,red,nir),tar} = & \beta_1 \bar{\rho}_{(g,red),est} + \beta_2 \bar{\rho}_{nir,est} + \beta_3 (\bar{\rho}_{(g,red),est} \cdot \bar{\rho}_{nir,est}) \\ & + \beta_4 (\bar{\rho}_{(g,red),est})^2 + \beta_5 (\bar{\rho}_{nir,est})^2. \end{aligned} \quad (6)$$

7. *SBAF1* – модель Fan и Liu [12] по предсказанию квадратичной зависимости отношения двух каналов только от NDVI и NDVI²:

$$\rho_{(green,red,nir),tar} = \rho_{(green,red,nir),est} \cdot (a + b \cdot NDVI + c \cdot NDVI^2). \quad (7)$$

8. *SBAF2* модель Nadal et al. по предсказанию экспоненциальной зависимости отношения двух каналов от NDVI:

$$\rho_{(green,red,nir),tar} = \rho_{(green,red,nir),est} \cdot (a \cdot e^{b \cdot NDVI} + c \cdot e^{d \cdot NDVI}). \quad (8)$$

9. *Scheffler c: nc* – модель Scheffler et al. [16]. Число кластеров nc задается на этапе обучения. Данные кластеризуются и для каждого кластера обучается своя модель *Multi Linear*. На этапе тестирования для входного мультиспектрального пикселя определяются ближайшие кластеры и результат получается как взвешенная сумма ответов моделей, обученных для этих соседних кластеров.

5 Результаты

Для удобства введем следующие краткие обозначения каналов: CA – канал аэрозоли, B – синий, G – зеленый, R – красный, NIR B – ближний инфракрасный широкий, NIR N – ближний инфракрасный узкий, SWIR1 – коротковолновый инфракрасный первый, SWIR2 – коротковолновый инфракрасный второй. В таблице. 1 приведены основные результаты по метрике RMSE для перехода от Landsat-8 к Sentinel-2A. Почти по всем каналам наилучший результат показывают методы Scheffler et al. [16]. В CA наилучший результат дает линейный метод, в NIR B и NIR N – Multi Linear Without Intercept и в SWIR2 – Linear и Multi Linear методы превосходят другие. Результат модели Scheffler et al. в этих каналах сравним с перечисленными методами и дает тот же порядок ошибки. Также MR1 Nadal показывает неплохой результат в G и R относительно более простых методов и сопоставим с лучшим результатом. SBAF1 показывает ухудшение в R канале относительно метода без коррекции (No correction). Экспоненциальная модель SBAF2 превосходит квадратичную SBAF1 в G канале, но показывает скудное качество в среднем.

Наибольший прирост качества наблюдается в первых трех каналах (CA, B, G) и NIR B. В свою очередь в R, NIR N, SWIR1 и SWIR2 даже самые простые методы могут превзойти по качеству большие пайплайны наподобие метода Scheffler et al. [16]. Самые большие значения ошибок можно заметить в NIR B, NIR N (наибольшие значения спектра вегетации наблюдаются именно в этих диапазонах) и в SWIR1, SWIR2 (данные каналы охватывают наибольший диапазон) (см. рис. 1)

6 Заключение

В данной работе мы рассмотрели задачу спектрального переноса, нашли современные решения, реализовали их, собрали собственный датасет и на нём обучили и сравнили каждое из них. Мы получили, что наилучшее качество по метрике RMSE в среднем показывает метод, предложенный Scheffler et al. [16]. В некоторых каналах он уступает другим, более простым решениям, но при должной настройке гиперпараметров, включенных в основную модель, этот алгоритм может добиться минимум того же качества. Также отдельно выделяется простой метод, предложенный нами, Multi Linear Without Intercept, который можно смело использовать для корректировки значений NIR B и NIR N каналов, так как в них он дает лучший результат. В целом, довольно простой подход разбиения данных на кластеры и использование обычной линейной регрессии [16] превосходит более сложные, но при этом универсальные модели, то есть одинаковые для всех типов сигналов [12], [13].

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №20-61-47089).

	CA	B	G	R	NIR B	NIR N	SWIR1	SWIR2
No correction	7.37 (0.0%)	6.45 (0.0%)	7.44 (0.0%)	8.44 (0.0%)	33.53 (0.0%)	19.67 (0.0%)	15.73 (0.0%)	11.16 (0.0%)
Linear	6.47 (12.33%)	6.15 (4.6%)	6.91 (7.1%)	8.41 (0.32%)		19.52 (0.79%)	14.79 (5.95%)	10.86 (2.72%)
Multi Linear	6.51 (11.73%)	5.99 (7.14%)	6.69 (10.03%)	8.47 (-0.36%)	19.56 (41.65%)	19.48 (0.98%)	14.71 (6.48%)	10.86 (2.7%)
Multi Linear Without Intercept	6.48 (12.06%)	5.96 (7.61%)	6.75 (9.21%)	8.47 (-0.38%)	19.52 (41.78%)	19.37 (1.51%)	14.86 (5.49%)	10.96 (1.85%)
MR1 Nadal			6.54 (12.08%)	8.31 (1.51%)		19.49 (0.94%)		
MR2 Nadal			6.57 (11.7%)	8.39 (0.56%)		19.49 (0.94%)		
SBAF1			6.7 (9.95%)	8.48 (-0.47%)		19.42 (1.27%)		
SBAF2			6.64 (10.75%)	8.42 (0.24%)		19.53 (0.71%)		
Scheffler c:30	6.53 (11.39%)	5.95 (7.74%)	6.51 (12.52%)	8.18 (3.02%)	19.55 (41.69%)	19.37 (1.51%)	14.67 (6.7%)	10.94 (1.95%)
Scheffler c:50	6.49 (11.97%)	5.94 (7.89%)	6.49 (12.69%)	8.16 (3.32%)	19.53 (41.75%)	19.38 (1.48%)	14.66 (6.76%)	10.92 (2.14%)

Таблица 1. Значения RMSE для всех рассмотренных методов как процент улучшения относительно Nearest метода. Рассмотрен переход из Landsat-8 в Sentinel-2A. Метод с наибольшим улучшением отмечен зеленым фоном. Желтым фоном отмечены два ближайших к лучшему методу. Серый фон означает, что данный канал не рассматривается методом. Для удобного оценивания значения RMSE домножены на 10^3

Список литературы

1. Li, J., Chen, B.: Global Revisit Interval Analysis of Landsat-8 -9 and Sentinel-2A -2B Data for Terrestrial Monitoring. *Sensors*. 20. 6631. (2020)
2. Тимофеев, В., Павлова, М., Смагина, А., Бочаров, Д.: Сегментация полей на спутниковых снимках Sentinel-2 с использованием исторических данных вегетационных индексов. ИТнС (2021)
3. Sidorchuk, D., Volkov, V., Gladilin S.: Perception-oriented fusion of multi-sensor imagery: visible, IR, and SAR Proc. SPIE 10696, Tenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2017), 106961I (13 April 2018); <https://doi.org/10.1117/12.2309770>
4. Dubbini, M., Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Gattelli, M.: Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. (2015)
5. Isa, S., Suharjito, S., Kusuma, G., Cenggoro, T.-Wawan.: Supervised conversion from Landsat-8 images to Sentinel-2 images with deep learning. *European Journal of Remote Sensing*. 54. 182-208. (2021)

6. Steven, M., Malthus, T., Baret, F., Xu, H., Chopping, M.: Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. *Remote Sens. Environ.* 88, 412–422. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2003.08.010> (2003)
7. Bilal, M., Nazeer, M., Nichol, J., Bleiweiss, M., Qiu, ., Jäkel, E., Campbell, J., Atique, L., Huang, X., Lolli, S.: A Simplified and Robust Surface Reflectance Estimation Method (SREM) for Use over Diverse Land Surfaces Using Multi-Sensor Data. *Remote Sensing*. 11. (2019)
8. Flood, N.: Continuity of Reflectance Data between Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI, for Both Top-of-Atmosphere and Surface Reflectance: A Study in the Australian Landscape. *Remote Sensing*. 6. 7952-7970. (2014)
9. Miura, T., Huete, A., Yoshioka, H.: An empirical investigation of cross-sensor relationships of NDVI and red/near-infrared reflectance using EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment*. 100. 223-236. (2006)
10. Trishchenko, A., Cihlar, J., Li, Z.: Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*. 81. 1-18. (2002)
11. Fan, X., Liu, Y.: A global study of NDVI difference among moderate-resolution satellite sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 121. 177-191. (2016)
12. Fan, X., Liu, Y.: A Generalized Model for Intersensor NDVI Calibration and Its Comparison With Regression Approaches. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 55. 1842 - 1852. (2017)
13. Villaescusa-Nadal, J., Franch, B., Roger, J.-C., Vermote, E., Skakun, S., Justice, C.: Spectral Adjustment Model's Analysis and Application to Remote Sensing Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. PP. 1-12. (2019)
14. Xiao, C., Li, P., Feng, Z., Liu, Y., Zhang, X.: Sentinel-2 red-edge spectral indices (RESI) suitability for mapping rubber boom in Luang Namtha Province, northern Lao PDR, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 93, 102176, ISSN 1569-8432, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102176>. (2020)
15. Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., Moreno, J.: Evaluation of Sentinel-2 Red-Edge Bands for Empirical Estimation of G LAI and Chlorophyll Content. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 11. 7063-81. 10.3390/s110707063. (2011)
16. Scheffler, D., Segl, K., Frantz, D.: Spectral harmonization and red edge prediction of Landsat-8 to Sentinel-2 using land cover optimized multivariate regressors. *Remote Sensing of Environment*. 241. 111723. (2020)
17. Claverie, M., Ju, J., Masek, J., Dungan, J., Vermote, E., Roger, J.-C., Skakun, S., Justice, C.: The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment*. 219. 145-161. (2018)
18. Vermote, E., Roger, J.-C., Franch, B., Skakun, S.: LaSRC (Land Surface Reflectance Code): Overview, application and validation using MODIS, VIIRS, LANDSAT and Sentinel 2 data's. 8173-8176. (2018)
19. Zhu, Z., Wang, S., Woodcock, C.: Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment*, 159, 269-277 (2015)
20. Бочаров, Д., Николаев, Д., Павлова, М., Тимофеев, В.: Алгоритм детекции и компенсации теней от облаков на мультиспектральных спутниковых снимках для местностей сельскохозяйственных угодий. *Информационные процессы* (2021)

Нормализация изображения лабораторного планшета с лунками для дальнейшего распознавания

Денис Шарапов^{1,2}, Сергей Корчагин¹, Егор Ершов¹

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия,

² Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия
sharapov.d@phystech.edu

Аннотация. Задача определения группы крови человека является одной из основных в медицине. Большинство лабораторных исследований по определению группы крови проводится вручную — за счёт зрительного наблюдения специалистом реакции агглютениции, вследствие чего возникает необходимость исключения человеческого фактора на алгоритмическом уровне. В данной работе предложены: алгоритм детекции прямых на лабораторном планшете между лунками; алгоритм нормализации изображения планшета; метод нахождения угла поворота планшета со средней ошибкой не более $0,3^\circ$.

Ключевые слова. Определение угла поворота планшета с лунками, быстрое преобразование Хафа, детектор границ Кэнни, морфологические преобразования, фильтр Гаусса.

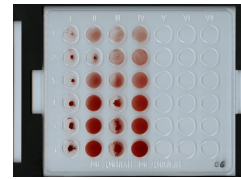
1 Введение

Для определения группы крови человека используют лабораторный планшет по системе АВО. В нём находится некоторое количество лунок, в которые помещаются реагенты. В эти же лунки помещают образцы крови и наблюдают наступление или отсутствие реакции агглютениции. Таким образом определяют группу крови человека.

Во многих лабораториях подобные исследования проводятся без дополнительного оборудования — только за счёт визуального наблюдения специалистом. Вследствие чего возникает риск человеческого фактора, который может повлечь за собой серьёзные последствия для здоровья пациента. Поэтому необходимо предоставить специалисту возможность проверить свои результаты определения группы крови на алгоритмическом уровне [1]: различия в результатах машины и специалиста могут стать сигналом для повторного проведения исследования. Одними из подзадач такого алгоритма являются нормализация изображения лабораторного планшета с лунками и распознавание лунок.

Под задачей нормализации изображения планшета с лунками понимается следующее. После того, как специалист смешал реагенты с кровью, планшет помещается в сканер. На полученном изображении планшет может быть повёрнут на малый угол в пределах $\pm 10^\circ$ относительно центра. Этот факт способен повлечь за собой погрешность в дальнейшем распознавании лунок. Поэтому непосредственно перед детекцией лунок необходимо определить угол поворота планшета и совершить поворот — в этом и состоит задача данной работы.

По форме лунок большинство планшетов относится к одному из двух типов: с круглыми лунками (рис. 1a) или с овальными лунками (рис. 1b). Поэтому в данной работе решалась общая задача для двух типов планшетов. Её решение заключалось в следующем. Сначала строился алгоритм построения сетки (grid) (раздел 3), а затем применялся один из методов определения параметра наклона прямых (раздел 5). После чего проводилась оценка точности полученного алгоритма (раздел 6) на созданном датасете изображений различных планшетов (раздел 2).



(a)



(b)

Рис. 1: Пример планшета (a) — с круглыми лунками, (b) — с овальными лунками

2 Создание датасета

Для оценки точности решения поставленной задачи был создан датасет изображений планшетов с лунками. Было получено 14 изображений различных планшетов с круглыми лунками и 12 изображений различных планшетов с овальными лунками.

Входное изображение уменьшалось так, чтобы наибольшая из его сторон не превышала 512 пикселей. Это необходимо для того, чтобы увеличить скорость работы алгоритма быстрого преобразования Хафа, который будет предложен в разделе 3. Затем совершался поворот на произвольный угол $\alpha \in (-10^\circ, 10^\circ)$ относительно центра изображения. После чего обрезались артефакты поворота, чтобы алгоритм нормализации не имел возможности на подсказку со стороны границ поворота. Результаты подготовки изображения приведены на рис. 2.

Каждое изображение планшета с овальными лунками было повёрнуто на произвольный угол 1 раз, а изображение планшета с круглыми лунками — 7 раз. Поэтому общий размер датасета составляет $14 \cdot 7 + 12 = 110$ изображений.

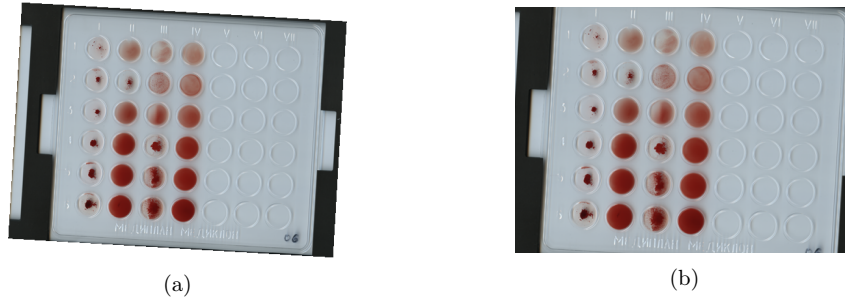


Рис. 2: Результаты подготовки изображений. (a) — изображение повёрнутого на $\alpha = -3,3^\circ$ планшета, (b) — обрезанное изображение повёрнутого планшета

3 Алгоритм построения сетки

Необходимо реализовать алгоритм, который получает на вход изображение планшета с лунками и подаёт на выход множество детектированных прямых на изображении.

Карта границ

Основная идея определения угла поворота планшета заключается в детекции прямых, проходящих в промежутках между лунками. Для этого необходимо получить карту границ со светлыми промежутками. Построение карты границ основано на применении оператора Кэнни [2] и последующей инверсии (рис. 3). Над полученной картой границ применяется операция морфологического открытия (эрозии) [3], чтобы уменьшить размеры светлых промежутков между лунками для более точной детекции прямых (рис. 4).

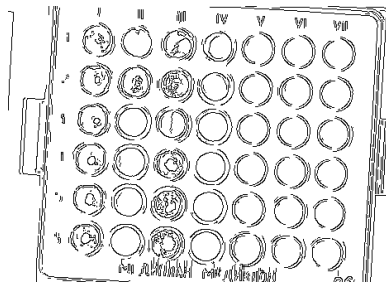


Рис. 3: Планшет под действием оператора Кэнни и инверсии

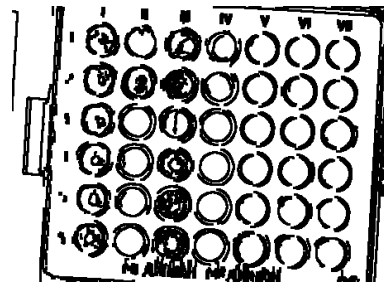


Рис. 4: Карта границ под действием эрозии

Алгоритм grid

В своей статье [4] авторы привели алгоритм быстрого преобразования Хафа (БПХ) для двумерных изображений. На вход этого алгоритма поступает изображение, а на выход — соразмерный Хаф-образ для конкретного типа прямых (преимущественно горизонтальных или вертикальных) — изображение в координатном пространстве (s, t) , где s — сдвиг прямой в пикселях, t — параметр наклона прямой в пикселях, в каждом пикселе которого стоит значение суммы по соответствующему координатам этого пикселя диадическому паттерну (дискретной прямой на изображении, аппроксимирующей непрерывную прямую).

Используя алгоритм БПХ, можно выбрать координаты (s, t) самой яркой точки на Хаф-образе, которая будет соответствовать искомой прямой в некотором промежутке между лунками. Таким образом, задача нахождения угла поворота планшета сводится к задаче нахождения параметра наклона t в (s, t) -параметризации прямых на изображении. Прямые с искомым параметром t будем называть *прямыми поворота планшета*.

Algorithm 1 Алгоритм построения сетки (grid)

1. Ко входному изображению применить оператор Кэнни.
 2. Полученную карту границ инвертировать.
 3. Применить эрозию к инвертированной карте границ.
 4. Применить фильтр Гаусса.
 5. Дополнить полученное изображение нулями.
 6. Вычислить Хаф-образ дополненного изображения.
 7. Вычислить координаты самой яркой точки Хаф-образа.
 8. Сохранить найденные координаты.
 9. Занулить окрестность прямой.
 10. Повторять действия 6-9 для получившегося в пункте 9 изображения пока значение пика Хаф-образа превышает некоторый порог.
-

На вход алгоритма grid (алгоритм 1) подаётся изображение планшета с лунками, а на выход — множество найденных прямых на изображении. В строках 1-3 строится карта границ. В строке 4 используется фильтр Гаусса. О необходимости его применения будет говориться в разделе 5. Затем в строке 5 изображение дополняется нулями до квадратного изображения так, чтобы максимальная из длин сторон стала равняться ближайшей степени двойки. Это необходимо для рекурсивного алгоритма БПХ. В строке 6 применяется алгоритм БПХ, а в строке 7 берутся координаты самой яркой точки на Хаф-образе. В строке 9 прямая с найденными параметрами (s, t) закрашивается чёрной прямой некоторой толщины, которая выбрана общей для двух типов планшетов — полтора диаметра наименьшей из всех лунок

всех планшетов. Это необходимо для того, чтобы избавиться от «крыльев» — результата вычисления Хаф-образа. Результат работы алгоритма приведён на рис. 5.

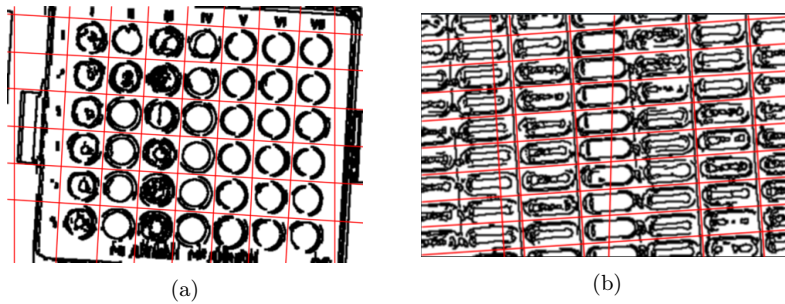


Рис. 5: Результат работы алгоритма grid на планшете (a) — с круглыми лунками, (b) — с овальными лунками

4 Алгоритм определения угла поворота планшета

Реализуем алгоритм, который получает на вход изображение планшета с лунками и подаёт на выход угол поворота планшета в градусах.

Algorithm 2 Алгоритм определения угла поворота планшета

1. С помощью алгоритма grid получить прямые на изображении.
 2. Использовать метод определения параметра наклона.
 3. Вычислить угол поворота в градусах.
-

Рассмотрим алгоритм определения угла поворота планшета (алгоритм 2). На вход подаётся изображение планшета с лунками, а на выход — угол поворота планшета относительно центра в градусах. С помощью алгоритма grid (алгоритм 1) получим множество прямых на изображении (строка 1). Затем по найденным прямым определим параметр наклона t с помощью одного из методов определения параметра наклона, рассмотренных в разделе 5 (строка 2). Найденный параметр наклона t позволяет вычислить угол поворота в градусах (строка 3)

$$\alpha = \arctan\left(\frac{t}{m}\right) \cdot \frac{180}{\pi},$$

где m — линейный размер квадратного (дополненного нулями) изображения.

5 Методы определения параметра наклона прямой поворота планшета

Ошибка определения угла поворота

Перед рассмотрением методов определения параметра наклона прямой поворота планшета необходимо ввести ошибку, чтобы иметь представление о точности рассматриваемого метода.

Пусть (см. рис. 6) θ_1 — реальный угол поворота планшета в градусах; θ_2 — угол поворота планшета в градусах, вычисленный с помощью алгоритма 2; $\theta = \theta_2 - \theta_1$ — ошибка определения угла поворота в градусах; h — ошибка определения угла поворота в пикселях; m — длина одной из сторон изображения; D — диаметр лунки. Тогда величину

$$r = \frac{h}{D} = \frac{m \operatorname{tg} \theta}{D}$$

будем называть относительной ошибкой определения угла поворота. Её геометрический смысл: это величина, показывающая часть лунки, на которую ошибается исследуемый метод.

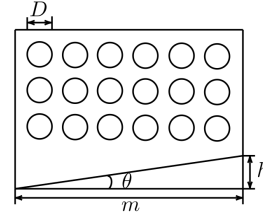
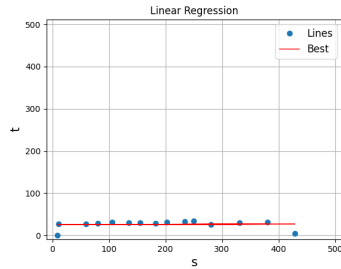


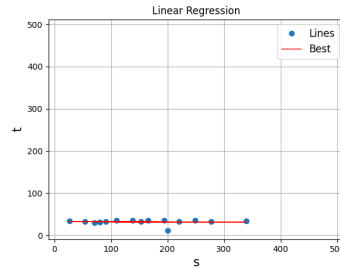
Рис. 6: К определению ошибки угла поворота

Метод наименьших квадратов (МНК)

В качестве одного из методов определения параметра наклона прямой поворота планшета рассмотрим метод наименьших квадратов. Для этого отметим найденные прямые точками в пространстве координат (s, t) и положим найденную с помощью данного метода прямую искомой (рис. 7).



(a)



(b)

Рис. 7: Результат работы алгоритма 2 с методом МНК для планшетов, изображённых на (a) — рис. 5а, (b) — рис. 5б

Метод медианы и фильтр Гаусса

Следующий метод — медианы. Он основан на взятии медианы среди найденных параметров наклона прямых между лунками. Для примера его использования отметим важность применения фильтра Гаусса [5] в алгоритме 1. Обратим внимание на изображение сетки без применения фильтра (рис. 8а). Видно, что прямые между лунками проходят не по центру светлых промежутков, что, в свою очередь, понижает точность определения угла поворота планшета. После применения фильтра самыми яркими пикселями в промежутках станут центральные пиксели, по которым и будут проходить прямые сетки (рис. 8б).

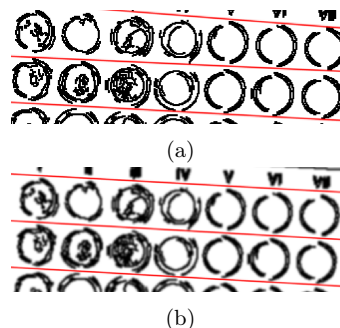


Рис. 8: Результат работы фильтра Гаусса (вертикальные линии опущены для наглядности)

Для сравнения результатов работы алгоритма до и после применения фильтра Гаусса запустим его с методом медианы на датасете из 14 планшетов с круглыми лунками, т. к. на них присутствуют широкие промежутки между лунками (в отличие от овальных лунок). Результат метода, рассмотренный на введённой ошибке, до применения фильтра составил $r = 4,008\%$, а после применения — $r = 3,123\%$.

Метод peak

Идея данного метода заключается в вычислении Хаф-образа пиков Хаф-образа исходного изображения, отмеченных в пространстве координат (s, t) (отсюда и название метода — «peak»).

Нанесём белым цветом на чёрное соразмерное изображение найденные с помощью алгоритма 1 пары (s, t) . Воспользуемся фильтром Гаусса и применим алгоритм БПХ. На найденном Хаф-образе выберем пик среди пар $(s_0, 0)$, т. к. необходимо найти параметр наклона среди параллельных прямых. Положим $t = s_0$, т. е. параметром наклона прямой поворота планшета будет сдвиг s_0 «наилучшей прямой» (рис. 9), соответствующий максимуму второго Хаф-образа.

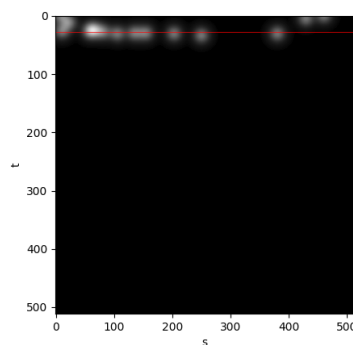


Рис. 9: Иллюстрация метода peak

6 Результаты

Результаты работы алгоритма 2 на датасете из 110 изображений для каждого из методов приведены в таблице 1.

method	r , %	θ°	r , Circles, %	θ° , Circles	r , Ovals, %	θ° , Ovals
Linear Regression	7,638	0,508	7,965	0,533	4,839	0,299
Median	4,186	0,285	4,234	0,288	4,103	0,259
Peak	4,199	0,284	4,252	0,287	4,086	0,255

Таблица 1: Результаты работы алгоритма 2 на датасете из 110 изображений для каждого из методов. В столбцах « r » и « θ » указаны значения средних ошибок по датасету. Обозначения «Circles» и «Ovals» подчеркивают средние ошибки на датасетах, состоящих только из круглых или овальных лунок соответственно

7 Заключение

В работе был предложен алгоритм нахождения угла поворота планшета на изображении. Удалось достичь значения ошибки не более $0,3^\circ$ угла поворота и 4,3% введённой относительной ошибки. Были исследованы три метода отбора параметра наклона прямой поворота планшета. Два из них — методы медианы и реак — отработали примерно с одинаковой точностью (см. табл. 1). Выбор наиболее устойчивого к непараллельным прямым (см. рис. 5) метода предпочтителен методу реак в силу статистической природы медианы и МНК: значение последних двух зависит от всех данных выборки, в то время как метод реак не реагирует на выбросы — непараллельные прямые.

Список литературы

1. Ravindran G., Pandiyan P., Pravin M., T. Joby Titus, "Determination and Classification of Blood Types using Image Processing Techniques ", International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 157 – No 1, January 2017.
2. John Canny. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, (6): 679-698, 1986.
3. Robert Fisher, Simon Perkins, Ashley Walker, Erik Wolfart. Hypermedia image processing reference. England: John Wiley & Sons Ltd, pages 118-130, 1996.
4. Ершов Е. И., Терехин А. П., Николаев Д. П. Обобщение быстрого преобразования Хафа для трехмерных изображений. Информационные процессы, Том 17, № 4, стр. 294-308, 2017.
5. Mark S. Nixon, Alberto S. Aguado. Feature Extraction and Image Processing, ISBN 0 7506 5078 8, page 86, 2002.

Методы определения реакции агглютинации на планшетах с круглыми лунками

Сергей Корчагин, Егор Ершов

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия
korchagin@eksli.com

Аннотация На протяжении последних двух десятилетий наблюдается бурный рост современных полуавтоматических систем лабораторной и домашней диагностики *in vitro*. Примером использования таких систем является тест-планшеты для определения группы крови по степени её агглютинации: после забора крови и заполнения планшета лаборанту не требуется анализировать результат реакций, а достаточно поместить планшет в специальный сканер для последующего автоматического распознавания. Оцифровка и автоматическое распознавание планшетов позволяет решить сразу две критически важные задачи: хранение результатов анализа и контроль человеческого фактора (согласно российскому законодательству неверное определение группы крови уголовно наказуемо). В работе предложен новый метод оценки наличия агглютинации в лунке планшета, как предварительный этап перед финальной вердиктовкой группы крови конкретного пациента. Метод состоит из двух шагов: выделения признаков изображения лунки и бинаризации по показателю дисперсии признаков для заданной лунки методом Оцу. На наборе данных из 252 лунок показано, что точность (ассигасу) наилучшего из предложенных решений составляет 95.2%.

Ключевые слова: агглютинация, классификация, детектор краёв Кэнни, вейвлет-преобразование, бинаризация, метод Оцу.

1 Введение

В настоящее время в медицинской диагностике *in vitro* выделяются три основных методики проведения анализов: ручной – исследование проводится лаборантом, автоматический – исследование проводится с использованием полностью автоматизированных систем, и полуавтоматический – подготовка реагента и тест-системы осуществляется лаборантом, а последующий анализ проводится автоматически. Все методы в той или иной степени распространены в клиниках, но, как показывает практика, ручной труд лаборанта не застрахован от человеческой ошибки, а полностью автоматические системы, хотя и являются наиболее удобными в использовании и производительными – чрезмерно дорогие. В данной работе рассматривается полуавтоматический случай, когда соблюдается баланс между контролем человеческого

фактора и стоимостью используемого оборудования, что делает её наиболее актуальной для небольших лабораторий и для домашнего использования. Подобная система позволяет оцифровывать полученные данные для их дальнейшего безвременного хранения и более удобного анализа.

Здесь и далее под термином агглютинация мы будем понимать склеивание и выпадение в осадок из однородной взвеси бактерий, эритроцитов и др. клеток, несущих антигены, под действием специфических веществ [8]. Анализ этой реакции позволяет построить системы определения группы крови: в современных тест-системах анализ комбинации реакции крови с разными агглютинидами позволяет установить группу крови пациента, смотри рисунок 1. Задачи создания подобного рода тест-систем и количественного анализа свойств этой реакции является актуальной научной задачей. Так, в статье [2] исследуется новый метод определения оценки степени агглютинации по изображениям, полученным с микроскопа. При этом важно понимать, что задача определения реакции агглютинации решается не только в задаче определения группы крови, но и, например, в задаче обнаружения возбудителей заболеваний, как это делается в [7].



Рис. 1: Пример планшета «Медиклон» для определения группы крови. Каждая строчка планшета содержит лунки с реакциями для одного пациента. Вердикт (группа крови) определяется набором бинарных состояний лунок в строке.

В этой работе рассматриваются задача определения степени агглютинации в лунке (смотри рисунок 1). Агглютинация, как правило, оценивается степенью зернистости крови в конкретной лунке. Для оценки степени зернистости в этой работе используется анализ дисперсии карты признаков

исходного изображения. Для вычисления признаков использовались детектор границ Кэнни [1] и дискретное двумерное вейвлет-преобразование [4]. Для установления факта наличия достаточного уровня агглютинации использовался метод бинаризации Оцу. На реальных данных показано, что наилучшая точность определения агглютинации составляет 95.2%.

2 Данные

Для экспериментов были выбраны многоцветные планшеты для проведения серологических реакций по ТУ 32.50.50-105-51203590-2020 состоящие из 42 прозрачных круглых лунок (Медиклон). Изображения лунок с химической реакцией были произведены с помощью медицинского сканера «Эксперт-Лаб» (рисунок 2). Изображения 14 планшетов предоставлены компанией Синтеко.



Рис. 2: Комплекс аппаратно-программный для регистрации результатов латексных агглютинационных геммагглютинационных анализов, изосерологических и иммуноферментных исследований «Эксперт-Лаб».

Планшеты (рисунок 1) устроены следующим образом: в каждом ряду находится анализы, относящиеся к одному пациенту, в первых четырёх колонках с кровью находятся реакции, кодирующие группу крови человека, последующие колонки либо пусты, либо содержат проверочную реакцию для подтверждения информации. Для корректной работы алгоритма предполагается, что все изображения выравнены. В данной работе в качестве входа подаётся точная разметка самих лунок: для каждой лунки размечен её центр и радиус.

Для разметки реакции агглютинации все планшеты были представлены 4 независимыми медицинским экспертам, вынесших консолидированную оценку. Лунки оценивались независимо, одна за одной, то есть вне конфигурационного контекста. Всего для разметки было выделено 4 основных состояния лунок: агглютинация присутствует, агглютинация отсутствует, агглютинация сложно определяема и лунка – пуста. В нашей задаче рассмат-

ривались только те лунки, которые принадлежат первым двум состояниям, сведя её к задаче бинарной классификации.

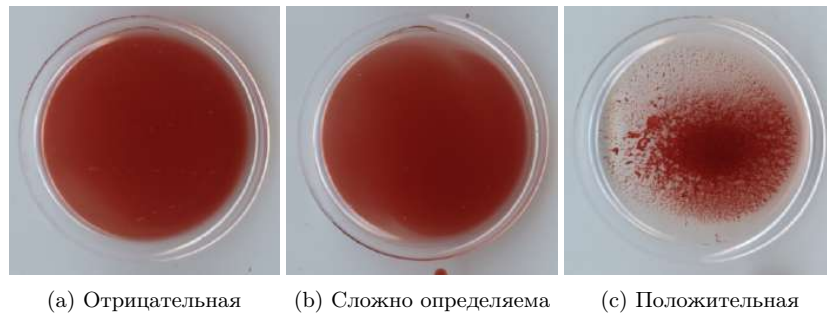


Рис. 3: Примеры разметки типа агглютинации независимыми экспертами.

Задача определения типа агглютинации не всегда является столь однозначной. Некоторые лунки достаточно легко соотнести к тому или иному типу, как видно из рисунков (3а, 3с), а некоторые лунки, даже эксперты не могут отнести к какому-то типу однозначно (рисунок 3б). Причём таких лунок достаточно много из всех представленных лунок 29% имеют состояние «агглютинация сложно определяема». Это объясняется совокупностью следующих факторов: плохая подготовка образца (недостаточно крови или агглютинаина), большое время между подготовкой планшета и его сканированием, неверные параметры сканирования (что приводит либо к высокому зашумлению сигнала, либо к переэкспонированию). Возможно это неполный список факторов, вопрос их перечисления и формализации является одним из направлений дальнейшего исследования. В данной работе рассматриваются только лунки с однозначным статусом (есть или нет агглютинации).

3 Решение

В данном разделе представлено описание решения по обнаружению агглютинации для каждой лунки. Общая схема работы метода с каждой лункой заключается в следующем:

1. Взять из исходного изображения только часть его в красном канале;
2. Преобразовать нужным образом изображение, выделив таким образом признаки для дальнейшего анализа;
3. Получить значение дисперсии признаков;
4. Классифицировать лунку по величине дисперсии признаков относительно глобального порога, полученного методом Оцу на тренировочной выборке.

Изображение в красном канале берётся из простых соображений того, что только он и содержит необходимую нам информацию для анализа. Ключевым моментом для работы стал выбор оптимального преобразования изображения в пространство признаков, в котором будет хорошо отображена зернистая природа агглютинации. Было рассмотрено два способа преобразования изображений для выделения признаков.

Первый основан на анализе карты границ, построенных при помощи детектора краёв Кэнни [1]. Для того, чтобы наиболее точно зафиксировать мелкозернистые преобразования Кэнни мы зафиксировали нижнее пороговое значение алгоритма в **0**, а верхнее в **40**. Результат преобразования можно увидеть на рисунке 5b.

Второй способ был вдохновлён работой [6] и основан на анализе двумерного дискретного двукратного вейвлет-преобразования с биортогональными вейвлетами. Вейвлет – это волнообразный всплеск с амплитудой, начинающейся в нуле, возрастающей, а затем уменьшающейся снова к нулю. Суть метода заключается в преобразовании сигнала текущего изображения низкочастотным (L) и высокочастотным (H) фильтром в начале по горизонтали, а потом по вертикали. Таким образом изображение можно разделить на детализирующие коэффициенты (после высокочастотного фильтра) и коэффициенты аппроксимации (после низкочастотного фильтра). На каждом уровне разложения получают 4 изображения, показывающие общую тенденцию значений в пикселях, а также детали горизонтальных, вертикальных и диагональных компонент (смотри рисунок 4a). Это разложение можно повторить несколько раз для дальнейшего увеличения частотного разрешения с дальнейшим прореживанием коэффициентов после НЧ и ВЧ-фильтрации (смотри рисунок 4b).

Эмпирическим методом была получена данная комбинация вейвлет-коэффициентов для описания резких перепадов интенсивности в красном канале:

$$I_t = \exp \frac{W}{\max W}, \quad (1)$$

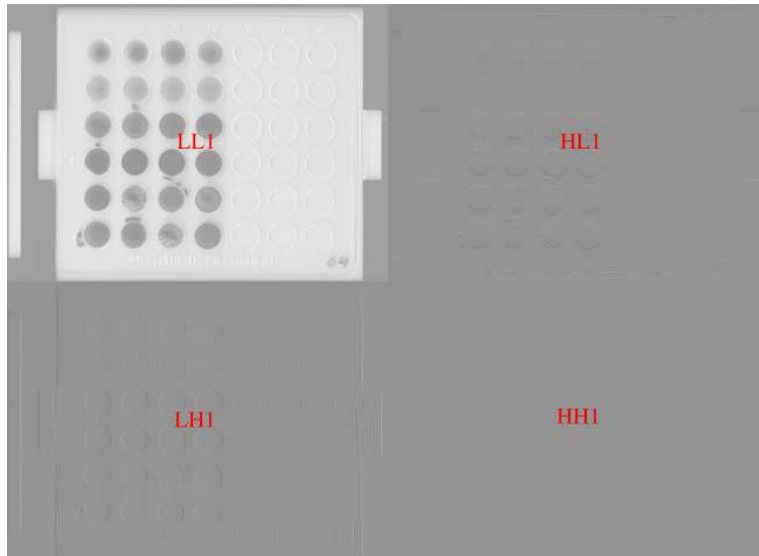
где

$$W = LH_2 + |\min LH_2| + HH_2 + |\min HH_2| + HL_2 + |\min HL_2|, \quad (2)$$

где LH_2 , HH_2 и HL_2 отвечают за вертикальные, горизонтальные и диагональные высокочастотные вейвлет-коэффициенты (смотри рисунок 4b). Результат преобразования можно увидеть на рисунке 5c. Идея этого метода была взята из статьи [6], где вейвлет преобразование использовалось на этапе предобработки данных перед подачей их на вход нейросети в задаче определения агглютинации.

Выделив одним из описанных выше способов признаки, в каждой лунке вычисляется значение дисперсии. Результаты построения одномерных гистограмм значений дисперсий по всем лункам для двух методов приведены на рисунке 6.

В таблице 1 приведены результаты наилучшего достижимого разделения, посчитанного с использованием разметки данных. Как видно, клас-

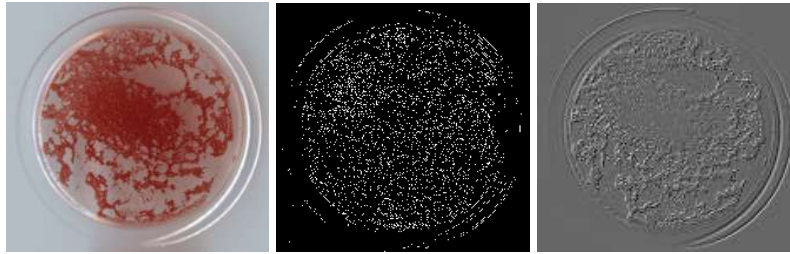


(a) Вейвлет преобразование 1-ого уровня.



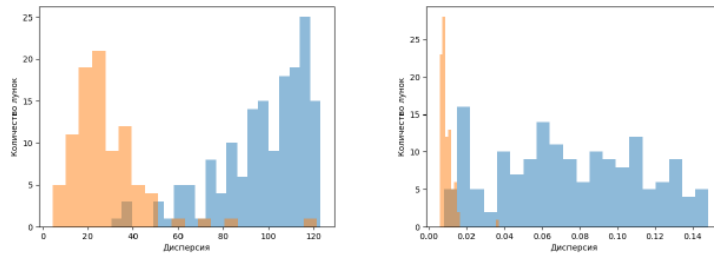
(b) Вейвлет преобразование 2-ого уровня.

Рис. 4: Результат однократного и двукратного дискретного вейвлет преобразования изображения.



(а) Исходное изображение. (б) Детектор краёв Кэнни. (с) Вейвлет-преобразование.

Рис. 5: Результат выделения карты особенностей каждым из преобразований



(а) Детектор краёв Кэнни. (б) Вейвлет-преобразование.

Рис. 6: Размеченные гистограммы дисперсии карты особенностей по всему набору данных. Оранжевым отмечены лунки без агглютинации, а синим – с нею.

сификация скалярным порогом не позволяет достичь на собранном наборе данных абсолютного качества, однако достижимое качество весьма велико и для признаков, посчитанных вейвлет-преобразованием, составляет 0,972.

Для автоматического подбора порога бинаризации в работе использовались две модификации метода Оцу: с предположением о равных весах кластеров [5] (классический метод) и в предположении, что веса могут быть произвольными [3]. Классический метод Оцу и его несбалансированная модификация показали полностью идентичные результаты, поэтому в таблице 1 с Ассигасу полученных результатов показан один общий результат.

Из рисунка 6а видно, что метод, основанный на использовании фильтра Кэнни позволяет строить распределения дисперсии признаков агглютинации близкой формы и с близкими весами, что является идеальным случаем для работы метода Оцу, что хорошо видно в таблице 1. Тем не менее, метод, основанный на вейвлет-разложении позволяет сделать 2 анализируемых

	Вейвлет признаки	Признаки Кэнни
Наилучшее разделение	0.972	0.960
Метод Оцу	0.801	0.952

Таблица 1: Точность изученных методов бинаризации.

класса более разделяемыми в лучшем случае, что будет очень полезно в случае усложнения задачи при классификации сложно определяемых случаев.

4 Заключение

В работе была рассмотрена задача анализа планшетов для определения группы крови по степени её агглютинации с разными реагентами. Метод с выделением особенностей изображения, основанном на фильтре Кэнни показывает высокое качество бинаризации реакции агглютинации в **0.952** на 252 лунках. Был рассмотрен метод выделения особенностей изображения, основанный на дискретном вейвлет-преобразовании изображения, позволяющий достигать теоретически наилучшего качества бинаризации в **0.972**. Направление развития работы: рассмотреть классификацию на большее число классов для учета бракованных лунок, применить нейросетевой подход для оценки достижимой точности интерпретируемыми алгоритмами, расширить постановку задачи для предсказания не только класса лунки но и для оценки степени уверенности предсказания (с учетом алиаторных и эпистемических ошибок).

Список литературы

- [1] John Canny. “A Computational Approach to Edge Detection”. В: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-8.6 (1986), с. 679–698. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [2] Chi Hyun Cho и др. “Measurement of RBC agglutination with microscopic cell image analysis in a microchannel chip”. В: *Clinical Hemorheology and Microcirculation* 56.1 (2014), с. 67–74.
- [3] Takio Kurita, Nobuyuki Otsu и N Abdelmalek. “Maximum likelihood thresholding based on population mixture models”. В: *Pattern recognition* 25.10 (1992), с. 1231–1240.
- [4] Yves Meyer. “Wavelets and Operators”. В: *Cambridge University Press* (1992).
- [5] Nobuyuki Otsu. “A threshold selection method from gray-level histograms”. В: *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 9.1 (1979), с. 62–66.
- [6] Yuji Oyamada и др. “A machine learning model of microscopic agglutination test for diagnosis of leptospirosis”. В: *PloS one* 16.11 (2021), e0259907.

- [7] Tsung-Feng Wu и др. “A rapid and low-cost pathogen detection platform by using a molecular agglutination assay”. В: *ACS central science* 4.11 (2018), с. 1485–1494.
- [8] Б. В. Петровский. “Большая медицинская энциклопедия”. В: *Советская энциклопедия* 1 (1974), с. 48–51.

Детекция лунок на планшетах, предназначенных для определения группы крови

Екатерина Зайченкова^{1,2}, Сергей Корчагин¹ и Егор Ершов¹

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия
zaichenkova.ee@phystech.edu

Аннотация Быстрое и точное определение группы крови – важная с медицинской точки зрения задача. В настоящее время во многих клиниках результаты соответствующего анализа устанавливаются врачами визуально, но автоматизация этого процесса позволила бы существенно повысить его точность и скорость. В данной статье предлагается алгоритм, позволяющий детектировать лунки на планшетах, используемых при проведении реакции для определения группы крови. Алгоритм подходит для детекции лунок круглой формы и основывается на использовании преобразования Хафа для окружностей. Эффективность предлагаемого метода продемонстрирована на примере его работы на 14 фотографиях планшетов.

Keywords: определение группы крови, анализ изображений, детекция окружностей, преобразование Хафа для окружностей, расстояние Фреше.

1 Введение

Информация о принадлежности человека к той или иной группе крови важна по ряду причин: она позволяет определить совместимость донора и реципиента при переливании крови и ее компонентов, предсказать вероятность иммунологического конфликта беременной женщины и ее ребенка, а также вероятность возникновения у человека определенных заболеваний. Ошибка же в определении группы крови может повлечь серьезные последствия, включая летальный исход для пациента и уголовную ответственность для врача.

Как правило, группу крови устанавливают путем выявления специфических антител и антигенов. Результаты реакции во многих клиниках определяются без использования специального оборудования, исключительно визуально, и в силу человеческого фактора (усталости, невнимательности, визуальной неоднозначности выхода реакции) могут быть установлены неточно или неправильно. Поэтому актуальной задачей является автоматизация

определения группы крови: она может не только повысить точность анализа, но и ускорить его проведение. Последнее особенно важно в экстренных ситуациях, например, когда человек незапланированно нуждается в переливании крови из-за травмы.

Для проведения реакций, целью которых является определение группы крови, кровь и реагенты наливают в лунки на специальных планшетах. Как следствие, корректная детекция этих лунок является подзадачей в автоматизации обработки результатов. Планшеты для анализа группы крови имеют либо круглые лунки, либо овальные; в данной статье рассматриваются планшеты с лунками круглой формы.

Одним из наиболее распространенных способов распознавания геометрических объектов является преобразование Хафа, которое позволяет свести задачу детекции объекта к поиску экстремумов в аккумуляторном пространстве его параметров. Оно было запатентовано Полом Хафом в 1962 году и изначально позволяло детектировать прямые. В 1972 году Дуда и Харт [1] предложили способ распознавать с его помощью дуги окружностей, а в 1975 Кимме, Баллард и Скланский [2] развили их идею, повысили эффективность алгоритма за счет использования информации о направлении границ и применили алгоритм для детекции опухолей на рентгеновских снимках грудной клетки.

Классическое преобразование Хафа имеет два существенных недостатка – высокая вычислительная сложность и использование больших объемов памяти, поэтому было предпринято множество попыток его усовершенствовать. Так, были разработаны две модификации, основанные на случайном выборе точек: случайное преобразование Хафа [3] и вероятностное преобразование Хафа [4]. Первое основывается на том, что достаточно простые кривые можно однозначно задать небольшим количеством принадлежащих им точек (например, в случае окружности нужно взять три точки), а точки эти можно выбирать случайно. Идея вероятностного преобразования Хафа заключается в том, что можно получить информацию об основных объектах на изображении, рассматривая лишь некоторое число случайно выбранных точек этого изображения. Оба этих метода имеют высокую скорость работы, однако использование элемента случайности приводит к потере точности.

Другой способ усовершенствовать преобразование Хафа был предложен Иллингвортом и Киттлером [5] и получил название адаптивного преобразования Хафа. В алгоритме преобразования Хафа для подбора параметров геометрической фигуры используется аккумуляторное параметрическое пространство (аккумулятор): каждой точке аккумулятора соответствует набор параметров, однозначно определяющий объект. Алгоритм присваивает точкам аккумулятора определенные значения, на основе которых делается вывод, какие из этих точек задают искомые объекты, – так и происходит детекция. От размера аккумулятора и сложности его устройства (с точки зрения поиска экстремумов) зависит трудоемкость решаемой задачи. Идея адаптивного преобразования Хафа состоит в том, чтобы повышать эффек-

тивность метода за счет упрощения аккумулятора. Достичь этого можно следующим способом: сначала запускается преобразование Хафа с аккумулятором такого размера, чтобы детекция происходила быстро и не требовала больших объемов памяти; при этом найти параметры объектов точно не удастся, но можно будет оценить, в каких пределах они лежат. Затем преобразование Хафа применяется снова, но в аккумуляторе рассматриваются только значения параметров, лежащие в найденных, интересующих нас, пределах. Повторяя этот процесс, можно детектировать объекты с желаемой степенью точности, и при этом на каждом шаге решать не настолько сложную задачу, чем при использовании оригинального способа. Другой способ упрощения аккумулятора состоит в том, чтобы параметры подбирать по частям, а не одновременно все. Например, окружности при детекции задаются двумя координатами центра и радиусом, и как следствие, в оригинальном преобразовании Хафа возникает необходимость работать с трехпараметрическим пространством. Иллингворт и Киттлер предложили сначала искать центры окружностей, а потом подбирать наилучший радиус для каждого центра, в результате чего на первом этапе решается двухпараметрическая задача, а на втором – однопараметрическая. Таким образом, адаптивное преобразование Хафа обеспечивает выигрыш в памяти и времени, но не позволяет искать несколько объектов одновременно. Для задачи детекции лунок это существенный недостаток, поскольку чаще всего используются планшеты, на которых лунок несколько десятков штук.

Та же проблема возникает в случае с некоторыми другими алгоритмами, используемыми для детекции геометрических объектов, такими как BFAOA [6], основанный на применении адаптивного алгоритма бактериального поиска в качестве оптимизатора, или метод RANSAC (RANdom SAMple Consensus), предложенным Фишлером и Боллесом в 1981 году [7]. RANSAC идейно похож на случайное преобразование Хафа: модель объекта тоже строится по нескольким случайно выбранным точкам, но после этого осуществляется проверка, сколько точек на изображении соответствуют этой модели. Недостатками RANSAC является то, что время вычисления параметров искомой модели не ограничено сверху и, как уже было сказано, алгоритм предназначен для поиска единственной модели.

Последняя проблема была решена Тольдо и Фузиэлло, в 2008 году разработавшими на основе RANSAC алгоритм J-Linkage [8]. В нем вместо аккумуляторного пространства строится пространство «концептуальное»: на изображении с использованием элемента случайности выбираются несколько множеств точек, каждое множество задает некоторую модель объекта; для каждой из выбранной точек находится *preference set*, «предпочитаемое множество», – набор моделей, к которым эта точка достаточно близко расположена; характеристическая функция каждого «предпочитаемого множества» – и есть точка в «концептуальном» пространстве. Если точки на исходном изображении принадлежат к одной геометрической структуре, то они близки примерно к одним и тем же моделям, поэтому «предпочитаемые ими множества» будут похожи. Это означает, что характеристические

функции этих «предпочитаемых множеств», то есть точки в концептуальном пространстве, тоже близки, и их можно объединить; такие объединения будем называть кластерами. Похожие друг на друга с точки зрения расстояния Жаккара кластеры также будем объединять: пока есть пара похожих кластеров, объединяем их в один. По окончании этого процесса на основе каждого кластера строится модель с помощью метода наименьших квадратов. Таким образом, J-Linkage позволяет распознавать несколько моделей одновременно, однако чувствителен к искажению формы искомым объектам и их неполному присутствию на изображении (например, когда вместо окружности только ее дуга). Смягчить эти недостатки удалось Магри и Фузизлло в 2014 году: они создали T-Linkage [9], модификацию J-Linkage, в которой вместо меры Жаккара используется коэффициент Танимото.

Для детекции окружностей также используются методы, основанные на применении сверточных масок и производных по направлению функции Гаусса [10]. Однако при поиске объектов, описываемых большим числом параметров, сложностью является подбор ядра свёртки.

В данной статье предлагается использовать для детекции лунок алгоритм, в основе которого лежит преобразование Хафа для окружностей. В Разделе 2 описан используемый датасет с фотографиями планшетов и обсуждены его особенности, существенные при выборе методов детекции. В Разделе 3 приведено подробное объяснение алгоритма поиска лунок, а четвертый Раздел содержит экспериментальные результаты. В пятом Разделе сделаны выводы и намечены пути дальнейшего усовершенствования алгоритма.

2 Используемый датасет

Детекция лунок производилась на фотографиях планшетов модели "Планшет многоразовый для проведения серологических реакций по ТУ 32.50.50-105-51203590-2020 на 42 лунки прозрачный полученных с помощью сканера Epson Perfection v550 Photo. Лунки расположены в 6 рядов по 7 лунок в каждом, форма лунок круглая, границы кольцеобразные и немного выступают над основной частью планшета. Внешний вид планшета показан на рис. 1, а пример фотографии планшета, на котором проводится реакция, приведен на рис. 3а.



Рис. 1:
Планшет

Описанные фотографии обладают рядом особенностей, которые определили выбор методов, используемых в предлагаемом алгоритме.

- Поскольку требуется распознать 42 лунки, неэффективно было использовать алгоритмы, не позволяющие детектировать несколько объектов одновременно.

- На карте границ, построенной по фотографии планшета, граница каждой лунки представляет из себя несколько дуг окружностей: частично распознанные внутреннюю и внешнюю границу выпуклого края лунки и блики на этом крае. Вследствие этого не подходят методы, неустойчивые при поиске объектов, присутствующих на изображении частично.
- Там, где произошла агглютинация (склеивание эритроцитов), выделяется множество границ вокруг капель крови, создающих с точки зрения решаемой задачи сильный шум. Поэтому малоэффективны алгоритмы, основанные на случайном выборе точек или чувствительные к шуму.
- На изображении границ присутствуют лишние с точки зрения решаемой задачи дуги окружностей, по характеристикам похожие на искомые границы лунок. К ним относятся, например, границы закругленных углов планшета. Требовалось научиться решать эту проблему.

3 Предлагаемый метод

Алгоритм детекции лунок заключается в следующем:

1. на фотографии планшета ищутся границы с помощью детектора Кэнни;
2. над изображением границ осуществляется морфологическое открытие;
3. при помощи преобразования Хафа для окружностей приближенно детектируются лунки;
4. полученная разметка лунок делается регулярной.

Вначале к фотографии планшета применяется алгоритм построения границ Кэнни [11], основанный на вычислении градиентов и применении гистерезисных порогов при отборе граничных пикселей (см. рис. 3b). Затем над изображением границ осуществляется операция морфологического открытия (эрозия с последующей дилатацией) [12]. Она убирает граничные (белые) пиксели, в окрестности которых много пустых (черных) пикселей, и, таким образом, уменьшает шум и сглаживает границы с острыми углами (см. рис. 3d). Большая часть граничных пикселей, стираемых открытием, приходится на тонкие и отстоящие друг от друга на некотором расстоянии границы склеившихся эритроцитов, а также плохо различимые на фотографии границы самого планшета. На искомые же границы лунок открытие влияет значительно меньше, потому что им соответствует несколько близко расположенных друг к другу дуг окружностей, то есть плотность белых пикселей в этих местах существенно выше. Таким образом, открытие позволяет не только повысить точность преобразования Хафа для окружностей [2], которое применяется вслед за ним, но и уменьшает время его работы: благодаря удалению части белых пикселей сокращается число вариантов окружностей, которые перебираются в преобразовании Хафа.

В работе используется модификация алгоритма преобразования Хафа для окружностей [2], предложенная в книге [13] и называемая ее авторами Hough gradient method, см. алг. 1.

Усовершенствование алгоритма заключается в том, что поиск центра и радиуса окружности не просто происходит отдельно, но сначала ищутся центры *всех* окружностей, а затем для *всех* окружностей оцениваются их радиусы. Добиться этого результата удастся благодаря использованию информации о градиентах.

При поиске координат центров создается двумерное аккумуляторное пространство (аккумулятор) $Acc(x_0, y_0)$. Строится оно таким образом: если на исходном изображении есть окружность (x_0, y_0, r) :

$$\begin{cases} x = x_0 + r \cos \varphi, \\ y = y_0 + r \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

то каждой точке (x, y) этой окружности в аккумуляторе соответствует окружность (x, y, r) :

$$\begin{cases} x_0 = x - r \cos \varphi, \\ y_0 = y - r \cos \varphi. \end{cases} \quad (2)$$

В преобразовании Хафа, предложенном в [2], при поиске центра окружности в аккумуляторе соответствующие ее точкам окружности строятся полностью. В модификации [13] же в аккумуляторе отмечаются только те точки, что находятся в направлении градиента и в обратном ему направлении на заданных расстояниях от рассматриваемого потенциального центра.

Предлагаемый метод также имеет ряд преимуществ, специфичных для исследуемой задачи детекции лунок.

- Из концентрических (или близких к концентрическим) окружностей выбирается только одна, что гарантирует детекцию на месте каждой лунки не более чем одной окружности, несмотря на наличие нескольких окружностей вокруг каждой лунки на изображении границ.
- Из концентрических (или близких к концентрическим) окружностей, как правило (с точностью до ожидаемой работы оператора Собеля), выбирается окружность наибольшего радиуса, что повышает вероятность распознать лунку полностью. Детектировать лунку целиком важно для решаемой задачи, потому что результаты реакции определяются тем, насколько содержимое лунки однородно.

Недостатком же данного алгоритма, согласно [13], является использование оператора Собеля для нахождения градиентов. Оператор Собеля легок в вычислении, но аппроксимирует градиент достаточно грубо, поэтому из-за него могут возникнуть шумы.

Алгоритм преобразования Хафа принимает на вход несколько параметров:

- \min_gad и \max_gad – минимальный и максимальный радиусы искомых окружностей соответственно;

- min_dist – наименьшее допустимое расстояние между центрами иско-
мых окружностей;
- acc_threshold – наименьшее количество точек, которое должно лежать
на окружности, чтобы она могла считаться детектированной.

Для оценки допустимого радиуса лунок и определения min_rad и max_rad используется «сетка», в которую вписаны лунки (см. рис. 2). «Сетка» [14] подается предлагаемому в данной статье алгоритму на вход, ее построение не является его частью. Получив «сетку», алгоритм вычисляет ее шаг: почти горизонтальные и почти вертикальные линии «сетки» приближаются соответственно горизонтальными и вертикальными прямыми, затем отдельно находится шаг по горизонтали и вертикали: вычисляются расстояния между каждой парой соседних прямых и берется медиана этих расстояний. Итоговый шаг «сетки» берется равным среднему между шагом по горизонтали и вертикали. Максимальный радиус лунки max_rad приравнивается к полученному шагу, минимальный min_rad – к половине этого шага, а в качестве min_dist берется удвоенный минимальный радиус min_rad .

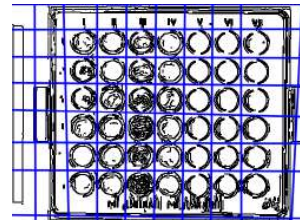


Рис. 2:
«Сетка»

Расположение лунок на планшете предполагается регулярным, а их размер – одинаковым, поэтому окружности, обнаруженные с помощью преобразования Хафа (см. рис. 3e), дополнительно обрабатываются: радиус каждой из них берется равным медиане радиусов всех детектированных окружностей, горизонтальная координата центра каждой окружности приравнивается к медиане горизонтальных координат центров всех окружностей в том же вертикальном ряду, а вертикальная координата центра приравнивается к медиане из вертикальных координат центров окружностей в том же горизонтальном ряду (см. рис. 3f).

4 Оценка точности метода

Для оценки того, насколько найденные алгоритмом лунки близки к истинным, используется расстояние Фреше, вычисляемое усовершенствованным способом [15]. Расстояние Фреше – это расстояние между двумя ориентированными ломаными в заданной метрике, в данном случае метрика евклидова, единица измерения – пиксель. Для вычисления этого расстояния рассматривают все возможные способы совместить точки двух ломаных (возможно, с повторениями), таким образом, чтобы сохранялось направление обхода каждой ломаной (точки ломаных расположены в фиксированном порядке, который нельзя нарушать), а начальная и конечная точки одной ломаной совпадали соответственно с начальной и конечной точками другой.

Алгоритм 1 Преобразование Хафа для окружностей

Входные данные: изображение планшета, `min_rad`, `max_rad`, `min_dist`, `acc_threshold`.

Вывод: `detected_circums` – список детектированных окружностей (задаваемых координатами центра и радиусом).

1: Построить карту границ `edges_image` с помощью алгоритма Кэнни.

Поиск координат центров окружностей

2: Создать двумерный аккумулятор.

3: Для каждой точки `acc_point` аккумулятора **выполнять**

4: завести список `voters(acc_point)`, в котором будут храниться координаты голосовавших за нее точек `edges_image`;

5: **Конец цикла**

6: Для каждой точки `point` карты границ `edges_image` **выполнять**

7: вычислить градиент с помощью оператора Собеля [16];

8: в аккумуляторе в направлении этого градиента и обратном ему увеличить на 1 значения всех точек, находящихся от `point` на расстояниях от `min_rad` до `max_rad`; обозначим эти точки `acc_voted(point)`;

9: для каждой точки `acc_point` из `acc_voted(point)` добавить `point` в `voters(acc_point)`;

10: **Конец цикла**

11: Найти в аккумуляторе локальные максимумы и выбрать те, которые больше `acc_threshold`. Обозначим их `centers`, потому что это потенциальные центры искомым окружностей.

12: Упорядочить `centers` по убыванию их значений в аккумуляторе.

Поиск радиусов окружностей

13: Для каждой точки `center` из `centers` **выполнять**

14: среди расстояний от `center` до каждой из точек `voters(center)` определить наименьшее `dist_1(center)` и наибольшее `dist_2(center)`;

15: для каждого расстояния `dist` от `dist_1(center)` до `dist_2(center)` посчитать, сколько точек `points_number(dist, center)` из `voters(center)` находятся на этом расстоянии от `center`;

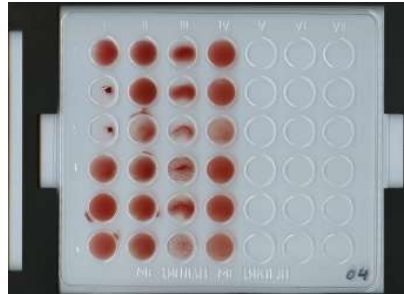
16: определить расстояние `radius`, для которого величина `points_number(radius, center)` максимальна;

17: **Если** между `center` и центром любой из ранее найденных окружностей расстояние не меньше `min_dist` **тогда**

18: считать окружность с данным центром `center` и радиусом `radius` детектированной, добавить ее в `detected_circums`;

19: **Конец условия**

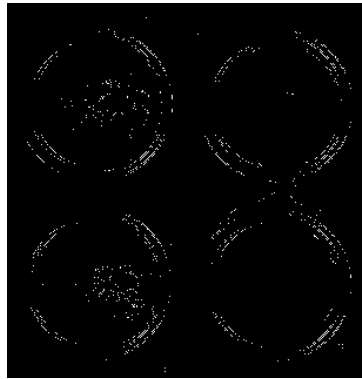
20: **Конец цикла**



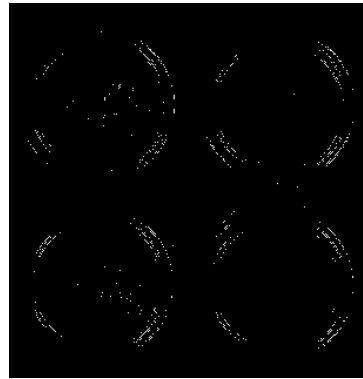
(a) исходная
фотография
планшета



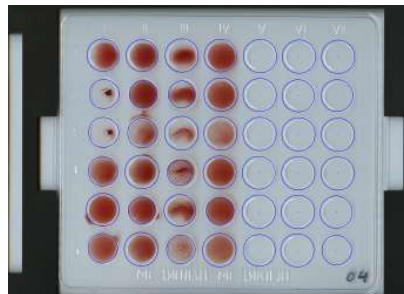
(b) границы,
детектированные
Кэнни



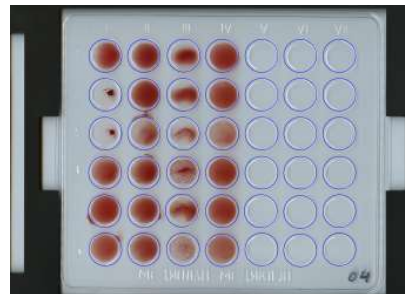
(c) фрагмент
изображения до
открытия



(d) фрагмент
изображения
после открытия



(e) детектированные
лунки



(f) обработанные
лунки

Рис. 3: Пример работы алгоритма детекции лунок

Для вычисления расстояния Фреше рассматривают все возможные способы совместить точки двух ломаных (возможно, с повторениями), таким образом, чтобы сохранялся порядок обхода точек каждой ломаной, а начальная и конечная точки одной ломаной совпадали соответственно с начальной и конечной точками другой. Каждый удовлетворяющий этим требованиям способ обозначим через *comb*. Для каждого найденного способа *comb* вычисляют расстояния $dist(i, j)$ между всеми парами совмещенных точек *i* и *j* и выбирают наибольшее из этих расстояний. Затем выбирают наименьшее из полученных наибольших расстояний, это и есть расстояние Фреше:

$$Frechet_dist = \min_{comb} (\max_{i,j} (dist(i, j)))$$

В классическом алгоритме нахождения расстояния Фреше используется рекурсивное вычисление расстояний между всеми возможными парами точек, где одна точка принадлежит первой ломаной, а другая – второй. Усовершенствование, предложенное в [15], заключается в том, чтобы значительно сократить число вычисляемых расстояний благодаря особому порядку рассмотрения пар точек, который позволяет с помощью уже посчитанных расстояний определять, какие из еще не вычисленных можно не находить.

В предлагаемом методе для вычисления расстояния Фреше между истинными и детектированными лунками, окружности представляются в виде ломаных с помощью перехода к полярным координатам. Для каждой из найденных окружностей рассматриваются те истинные окружности, центры которых лежат внутри нее, и для этих окружностей считается расстояние Фреше. Если расстояние Фреше между найденной и истинной окружностями меньше порогового числа процентов от радиуса истинной окружности, то детектированная окружность считается распознанной корректно.

Пример проверки найденных окружностей (пороговое значение корректности распознавания – 10% от радиуса истинной окружности) приведен на рис. 4. В табл. 1 представлены численные результаты работы алгоритма (расстояние Фреше указано в процентах от радиуса истинных лунок).

5 Заключение

Возможность автоматически обрабатывать результаты анализов по определению группы крови является актуальной и важной задачей. Для ее решения необходимо уметь детектировать на изображениях медицинских планшетов лунки, в которые наливаются кровь и реагенты. В данной статье предложен метод решения этой подзадачи для планшетов с лунками круглой формы. Обоснован выбор используемого алгоритма и приведены численные результаты, подтверждающие его эффективность.

Представленный алгоритм основан на применении преобразования Хафа и позволяет детектировать лунки со средней точностью 96%. Среднее время работы алгоритма составляет 12.03 секунды.

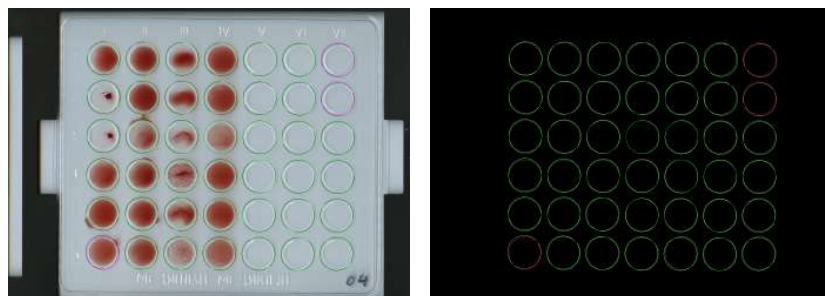


Рис. 4: Пример проверки возвращенных алгоритмом окружностей

№	размер, пикс.	порог, %	точность	полнота	р. Фреше, %	время, с
1	(2538, 3052)	10	1.00	1.00	6.91	12.13
2	(3060, 4211)	10	1.00	1.00	3.39	11.33
3	(3060, 4211)	10	1.00	1.00	4.62	11.44
4	(3060, 4211)	10	1.00	1.00	4.48	12.17
5	(3060, 4211)	10	0.93	0.93	6.06	10.88
6	(3060, 4211)	10	0.91	0.91	6.37	12.25
7	(3060, 4211)	10	1.00	1.00	3.22	11.48
8	(2538, 3052)	10	1.00	1.00	3.06	11.60
9	(3060, 4211)	10	1.00	1.00	1.84	12.30
10	(3060, 4211)	10	0.86	0.86	7.44	12.85
11	(3060, 4211)	10	1.00	1.00	5.21	10.81
12	(3060, 4211)	10	0.81	0.81	7.88	12.20
13	(3060, 4211)	10	1.00	1.00	4.08	14.09
14	(3060, 4211)	10	1.00	1.00	3.19	12.85

Таблица 1: Результаты работы алгоритма для 14 фотографий планшетов.

В столбце «размер» указан размер фотографии в пикселях; в столбце «порог» – процент от радиуса истинной лунки, больше которого не может быть расстояние Фреше между истинной и детектированной лунками, если лунка детектирована корректно; в столбце «р. Фреше» – средний процент от радиуса истинных лунок, который составляет расстояние Фреше по тем детектированным лункам, центры которых находятся внутри соответствующих истинных лунок; в столбце «время» – время работы алгоритма в секундах.

Среднее расстояние Фреше между детектированной и истинной лунками в процентах от радиуса соответствующей истинной лунки равняется 4.84%.

В дальнейшем планируется повысить точность детекции круглых лунок: попытаться найти аналог оператору Собеля, чтобы точнее приближать градиенты без существенной потери скорости вычисления: уменьшить вероятность распознавания лишних окружностей и увеличить вероятность распознавания нужных, а также разработать алгоритм детекции овальных лунок.

Список литературы

1. Richard O Duda and Peter E Hart. Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*, 15(1):11–15, 1972.
2. Carolyn Kimme, Dana Ballard, and Jack Sklansky. Finding circles by an array of accumulators. *Communications of the ACM*, 18(2):120–122, 1975.
3. Lei Xu, Erkki Oja, and Pekka Kultanen. A new curve detection method: randomized hough transform (rht). *Pattern recognition letters*, 11(5):331–338, 1990.
4. Nahum Kiryati, Yuval Eldar, and Alfred M Bruckstein. A probabilistic hough transform. *Pattern recognition*, 24(4):303–316, 1991.
5. John Illingworth and Josef Kittler. The adaptive hough transform. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (5):690–698, 1987.
6. Sambarta Dasgupta, Arijit Biswas, Swagatam Das, and Ajith Abraham. Automatic circle detection on images with an adaptive bacterial foraging algorithm. In *Proceedings of the 10th annual conference on genetic and evolutionary computation*, pages 1695–1696, 2008.
7. Martin A Fischler and Robert C Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6):381–395, 1981.
8. Roberto Toldo and Andrea Fusiello. Robust multiple structures estimation with j-linkage. In *ECCV*, 2008.
9. Luca Magri and Andrea Fusiello. T-linkage: A continuous relaxation of j-linkage for multi-model fitting. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pages 3954–3961, 2014.
10. Hector SANDOVAL, Yasutami CHIGUSA, and Taizoh HATTORI. Circle detection using directional derivatives of gaussian.
11. John Canny. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (6):679–698, 1986.
12. Robert Fisher, Simon Perkins, Ashley Walker, and Erik Wolfart. Hypermedia image processing reference. *England: John Wiley & Sons Ltd*, pages 118–130, 1996.
13. Gary Bradski and Adrian Kaehler. *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. "O'Reilly Media, Inc. 2008.
14. Денис Шарапов, Сергей Корчагин, Егор Ершов. Нормализация изображения лабораторного планшета с лунками для дальнейшего распознавания. *Конференция ИТuС 2022*.
15. João Paulo Figueira. Fast discrete fréchet distance, Sep 2020.
16. Irwin Sobel and G. M. Feldman. An isotropic 3×3 image gradient operator. 1990.

Автоматический скоринг кальцификации коронарных артерий с использованием мультиклассовой сегментации

Ломакин Федор^{1,2} Самохин Валентин^{1,2}

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А.Харкевича

² Московский физико-технический институт (государственный университет)
lomakin.fv@phystech.edu

Аннотация Кальцификация коронарных артерий является важным фактором риска сердечно-сосудистых заболеваний и может быть определена по данным компьютерной томографии. С растущим числом исследований возрастает актуальность методов автоматической разметки медицинских изображений. В связи с этим встаёт вопрос об их интерпретируемости и применимости в клинических условиях. В этой работе мы предлагаем метод автоматического скоринга индекса Агатстона с использованием мультиклассовой сегментации. Он позволяет не только понять степень кальцификации коронарных артерий в целом, но и вовлеченность каждой артерии по отдельности. Качество алгоритма оценивается на выборке, состоящей из примеров, отличающихся степенью кальцификации и наличием искусственных структур, которые были размечены несколькими врачами-радиологами.

Ключевые слова: Глубокое обучение, медицинская визуализация, кальцификация коронарных артерий, семантическая сегментация, мультиклассовая сегментация.

1 Введение

Ишемическая болезнь сердца занимает первое место среди причин смертности в мире [8]. Среди КТ-исследований сканирование грудной клетки является самым частым. В каждом КТ грудной клетки всегда включается сердце, а значит все коронарные сосуды. Поскольку сканирование коронарных артерий с кальцием (САС) было интегрировано в оценку риска атеросклеротических сердечно-сосудистых заболеваний (ASCVD) у бессимптомных пациентов с включением в многочисленные руководства, то появилась необходимость автоматизировать процесс оценки САС.

Для количественной оценки САС в 1990 году был введен индекс Агатстона (AS) [1], и с тех пор он стал общепринятым стандартом для измерений. Этот показатель рассчитывается с использованием информации об интенсивности вокселей и отражает общую площадь отложений кальция и их плотность.

$$AS = \frac{1}{3} \sum_z \sum_{cc} w_{cc}(i_{cc}) \cdot S_{cc} \quad (1)$$

$$w_{cc}(i_{cc}) = \begin{cases} 0, & \text{if } \max(i_{cc}) < 130 \\ 1, & \text{if } 130 \leq \max(i_{cc}) < 200 \\ 2, & \text{if } 200 \leq \max(i_{cc}) < 300 \\ 3, & \text{if } 300 \leq \max(i_{cc}) < 400 \\ 4, & \text{if } \max(i_{cc}) \geq 400 \end{cases} \quad (2)$$

Первое суммирование происходит по аксиальным срезам, второе - по компонентам связности (cc), найденным в срезе, i_{cc} - интенсивность вокселя, измеренная в HU, w_{cc} - веса каждой компоненты, определенные в (2), S_{cc} - размер компоненты, измеренный в мм². Формула в [1] указана для исследований, в которых расстояние между аксиальными срезами равняется 3 мм. В нашей работе оно равно 1 мм, поэтому AS нормализуется.

Для стандартизации описания находок по кальцификации коронарных артерий широко используется система CAC-DRS [2], рекомендуемая к применению Обществом кардиоваскулярной компьютерной томографии (Society of Cardiovascular Computed Tomography - SCCT). Помимо количественной оценки степени риска и стратификации пациентов на группы риска на основе индекса Агатстона (1), в [2] предлагается также оценивать число вовлеченных артерий. Единая цифра для анализа всего коронарного кальция может дать неправильную трактовку степени тяжести поражения сосудов по сравнению с учетом различных сосудов и степени их вовлеченности в атеросклеротический процесс. Поэтому разработка модели, способной с точностью до конкретной артерии указать локализацию кальцинатов, имеет особую практическую ценность.

Существует множество работ, цель которых - автоматический скрининг кальцификации коронарных артерий. Они могут отличаться

1. использованием дополнительного модуля для сегментации сердца в качестве подготовительного этапа
2. использованием двухмерных или трехмерных данных на входе
3. выборками, использованными в экспериментах и получаемыми с помощью разных настроек томографа

Наиболее близкой к нашей работе является [6], также использующая глубокие сверточные сети для мультиклассовой сегментации кальцинатов. Несмотря на высокое (Cohen's $\kappa = 0.89$) качество работы на исследованиях, выполненных с ЭКГ-синхронизацией ³, предложенный в [6] алгоритм демонстрирует низкое качество (Cohen's $\kappa = 0.52$) на других подвыборках, взятых с потоков разных клиник. Для скрининга кардиологических заболеваний наиболее высокую практическую ценность несет качество работы

³ помогает снизить негативное влияние пульсации на качество изображения, тем самым упрощая работу радиолога или автоматического алгоритма

на исследованиях, выполненных без ЭКГ-синхронизации, поскольку именно они составляют основную долю исследований, проводимых в медицинских учреждениях. Хорошая работа на такой выборке является отличительной особенностью предложенного нами метода.

2 Данные

Для обучения и тестирования использовалась выборка из 88 КТ-изображений. Каждое КТ размечено двумя или более врачами-радиологами. В разметке участвуют 5 классов:

- Кальцинация левой передней нисходящей артерии (LAD);
- Кальцинация левой огибающей артерии (LCX);
- Кальцинация правой коронарной артерии (RCA);
- Кальцинация створок клапана;
- Стенты.

Стенты представляют собой металлические импланты и нередко ставятся при ряде болезней сердечно-сосудистой системы.

Каждый объект датасета состоит из КТ-изображения, размер которого $512 \times 512 \times z$, где z - это число аксиальных срезов, и разметки нескольких врачей (рис. 1).

Для экспериментов мы делаем стратифицированное разделение на 3 части: обучающая, валидационная и тестовая. Метки, используемые для стратификации, включают информацию о группе риска, наличии стентов и кальцификации клапанов. Для обучения использовалось 45 КТ-изображений, для валидации - 15 и для теста - 28.

Распределение по группам риска и по наличию данного класса в разметке КТ-изображения представлено в таблицах 1 и 2.

Таблица 1: Распределение данных по группам риска

CAC-DRS	
0 (Нет кальция)	22
1 (AS 1-100)	31
2 (AS 100-300)	11
3 (AS >300)	24
Всего	88

Таблица 2: Содержание объектов разных классов в примерах датасета

Содержат	
кальцинацию LAD	56
кальцинацию LCX	44
кальцинацию RCA	34
кальцинацию клапанов	39
стенты	17
Всего	88

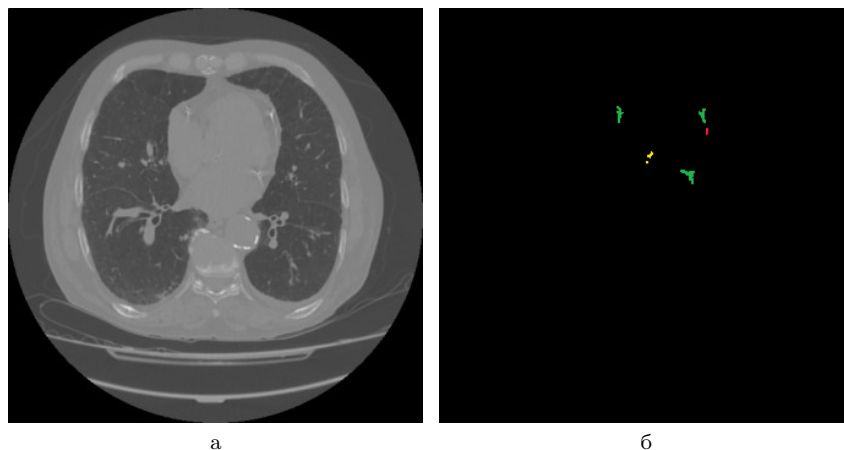


Рис. 1: Объект датасета. коронарный кальций отмечен красным, кальций на створках клапана - желтым, стенты - зеленым.

Ограничения

Как и любой другой алгоритм компьютерного зрения, предложенный метод ограничен в применении особенностями данных, использованными при его обучении. В силу размера датасета и анонимизированности исследованный невозможно стандартизировать выборку по всем возможным демографическим группам пациентов, а также разнообразить ее исследованиями с распространенными в меньшей степени анатомическими особенностями. С технической стороны, КТ-исследования, использованные в экспериментах, были выполнены с использованием стандартной дозы облучения и мягкотканых ядер и без использования контраста, что заведомо ставит качество работы алгоритма на выборках, подготовленных с использованием других радиологических протоколов, под вопрос.

3 Модель

За основу модели взят UNet [3]. При этом обычные сверточные слои заменены на Residual blocks [4]. Блок-схема модели представлена на рисунке 2.

Перед тем как данные поступают на вход сверточной нейронной сети, каждое КТ-изображение проходит процесс предобработки. Прежде всего, значение каждого вокселя нормализуется и приводится к интервалу $(-1, 1)$. Кроме этого, для задачи сегментации коронарного кальция выгодно с точки зрения скорости работы алгоритма сегментации и с точки зрения уменьшения дисбаланса в данных использовать дополнительный предобученный

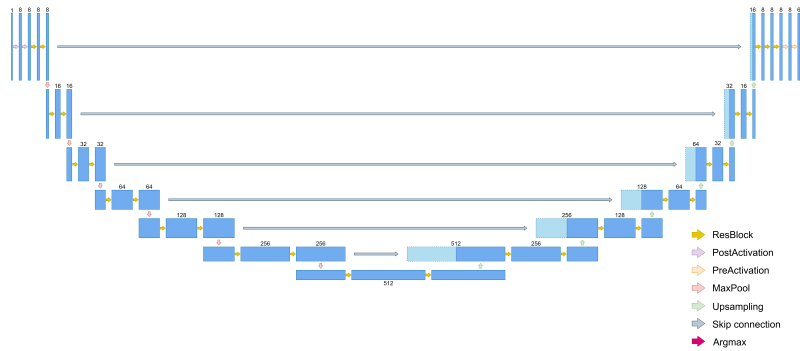


Рис. 2: Схема нейронной сети

модуль для нахождения перикарда. Для этих целей мы использовали модель с архитектурой на основе UNet, которая была обучена на данных, по происхождению и свойствам близких тем, что используются в нашей работе. Исходное изображение и маска кальциноват обрезаются по маске перикарда с небольшим отступом, чтобы гарантировать, что все объекты, представляющие интерес, лежат внутри обрезанной картинке (рис. 3). Мы убедились, что это утверждение выполняется на использованной выборке, и модуль для выделения перикарда не мешает нахождению кальциноват в рамках проводимых экспериментов.

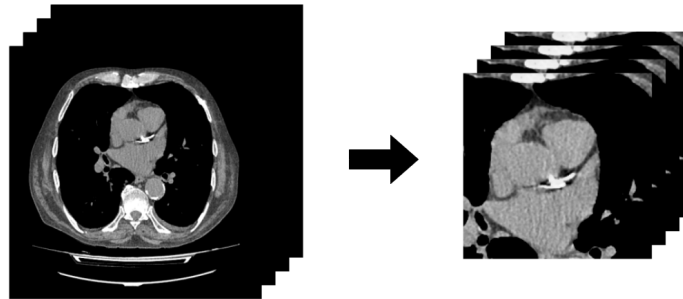


Рис. 3: Выделение перикарда.

В качестве функции потерь используется измененная кросс-энтропия:

$$\text{MCE}(x, y, i) = - \sum_{\substack{i \geq 130 \\ k}} y_k \cdot \log x_k, \quad (3)$$

где x_k – вероятность принадлежности вокселя к классу k , полученная на выходе модели, а y_k служит индикатором принадлежности вокселя классу k . Суммирование производится по всем классам $k = 0..5$ и по вокселям, интенсивность i которых превышает порог 130 HU, поскольку остальные части изображения заведомо не являются кальцинатами или стентами [1]. На этапе тестирования предсказание фильтруется по интенсивностям исходного изображения аналогичным образом.

Как алгоритм оптимизации выбран Adam [7] с экспоненциальным шагом, который начинается с $3 \cdot 10^{-4}$ и умножается на 0.5 каждые 2 эпохи.

В силу ограниченных ресурсов, в частности ограниченного размера видеопамяти, в процессе обучения использовались не целые исследования, а патчи - части исследования фиксированного размера меньшего, чем исходное изображение. Во время обучения центр патча выбирается случайным образом, а на этапе тестирования входное изображение делится на одинаковые патчи, и предсказания на патчах склеиваются в итоговую маску.

4 Метрики

Для оценки качества сегментации мы использовали dice. Мы смотрели на dice для каждого класса по отдельности и микро-усредненный dice коронарного кальция.

$$\text{Dice} = \frac{2 \sum y_t \times y_p}{\sum y_t + \sum y_p} \quad (4)$$

y_t - воксели целевой маски, y_p - воксели предсказанной маски

Для оценки разделения пациентов по группам риска использовался коэффициент Cohen's κ [5]. Он позволяет измерить согласованность работы алгоритма и врача-радиолога.

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \quad (5)$$

В (5) p_o - наблюдаемое согласие оценщиков, p_e - гипотетическая вероятность случайного согласия.

Для понимания того, насколько хорошо модель отличает типы кальцинатов, мы строили покомпонентную матрицу ошибок.

5 Результаты

Были проведены эксперименты с разными размерами батча и патча. Наилучшие метрики показала конфигурация с размером патча = (170, 170, 50) и батчем = 10. Результаты классификации исследования по степени риска и матрица ошибок для покомпонентной мультиклассовой классификации кальциноватов показаны на рисунке 4.

Наша модель показала следующие результаты: Cohen's κ - 0.92, dice - 0.71, precision - 0.59, recall - 0.59.

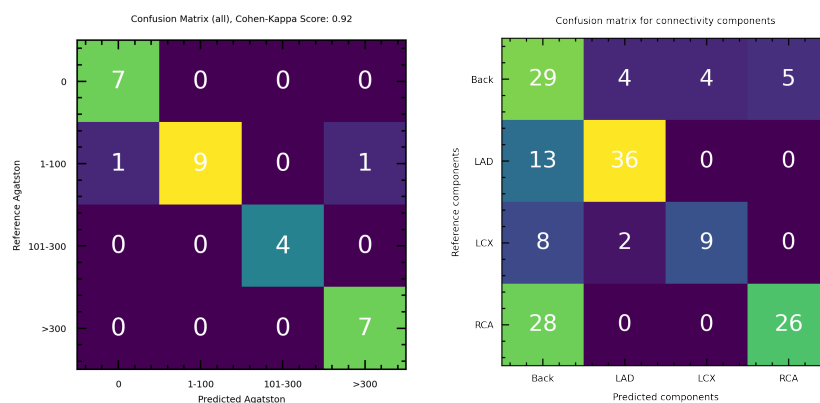


Рис. 4: Деление исследований на группы риска и матрица ошибок для классификации кальциноватов.



Рис. 5: Пример пропуска кальцината моделью (отмечен красным кругом).

На рисунке 5 показан случай, на котором модель пропустила кальцинат в левой передней нисходящей артерии. хотя в разметке он значится как LAD. Этот случай можно трактовать как пограничный, поскольку кальцинат находится в коронарном выступе и иногда трактуется экспертами как кальцинация стенки аорты.

6 Заключение

Метод, полученный в работе, позволяет делать мультиклассовую сегментацию кальцификации коронарных артерий и автоматически выполнять скоринг индекса Агатстона. В отличие от бинарной сегментации, он дает понять вовлеченность каждой артерии по отдельности, что важно для разделения локализации оперативного вмешательства.

Список литературы

1. Arthur S. Agatston, Warren R. Janowitz, Frank J. Hildner, Noel R. Zusmer, Manuel Viamonte, Robert Detrano: Quantification of coronary artery calcium using ultrafast computed tomography. *Journal of the American College of Cardiology*. (1990)
2. Hecht HS, Blaha MJ, Kazerooni EA, Cury RC, Budoff M, Leipsic J, Shaw L: CAC-DRS: Coronary Artery Calcium Data and Reporting System. An expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT). *J Cardiovasc Comput Tomogr*. (2018)
3. Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, and Thomas Brox: U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention 2015*. (2015)
4. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, and Jian Sun: Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. (2016)
5. Cohen, Jacob: A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*. (1960)
6. Eng D., Chute C., Khandwala N.: Automated coronary calcium scoring using deep learning with multicenter external validation. *Npj digital medicine*. (2021)
7. Diederik P. Kingma, Jimmy Ba: Adam: A Method for Stochastic Optimization. *ICLR (Poster)*. (2015)
8. Web page of World Health Organization: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>.

Обучение алгоритма оценки освещения для произвольного сенсора на основе гиперспектральных изображений с оценкой освещения

Артём Паншин^{1,2}, Василий Тесалин^{1,2}, Егор Ершов¹, Денис Шепелев¹

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия,

² Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия
panshin.av@phystech.edu

Аннотация При создании новой камеры требуется производить её калибровку и настройку. В ряде случаев для калибровки некоторых алгоритмов обработки изображений требуется большой набор данных, как, например, в случае алгоритмов оценки цветности освещения. В данной статье исследуется возможность обучения алгоритма оценки цветности источника для новой целевой камеры по синтезированным изображениям, полученных из гиперспектральных изображений и спектральных чувствительностей целевой камеры. Описывается процедура синтеза таких изображений, производится обучение и тестирование современного алгоритма оценки цветности освещения на основе нейронных сетей. Сравняются и анализируются результаты обучения алгоритма на синтезированном и реальном наборах данных.

Ключевые слова: Синтез цветных изображений, гиперспектральные изображения, оценка цветности источника, нейросетевые алгоритмы.

1 Введение

Существует задача оценки цветности освещения, которая используется для обработки цветных сырых изображений и автоматического баланса белого. Существует много как статистических методов [1], так и нейронных моделей, занимающихся этой задачей [2].

Однако для применения нейронных сетей есть одно значимое требование – для каждой камеры со своими чувствительностями необходимо собирать собственный датасет. Причиной такого требования является различие между сенсорами камер, что приводит к некорректной работе нейронных сетей, обученных на одних фотографиях одной камеры, примененных к фотографиям другой камеры. Сбор датасета представляет собой трудоемкую и затратную по времени задачу, не позволяющую применять алгоритм для всех камер. Сейчас актуальные датасеты, позволяющие максимизировать

результаты обученных сетей, весьма ограничены в разнообразии используемых камер. Например, Cube++ [3], снят на Canon 600D, ColorChecker [4] снят на Canon 1D и Canon 5D. Самое большое количество камер было применено в сборе INTEL-TAU [5], где использовались 7 камер. Как видно из перечисленных актуальных датасетов, пока невозможно вручную покрыть все существующие камеры.

Избавиться от необходимости собирать датасет для каждой фотографии можно, если собрать один датасет на гиперспектральной камере и затем моделировать на нем измерения целевой камеры, для которой предварительно измерены чувствительности. Так, цветное изображение можно смоделировать по гиперспектральному согласно линейной модели формирования:

$$\mathbf{c} = \int_{\omega} i(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \mathbf{s}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

где $\mathbf{c} = [R, G, B]$ – отклики камеры, λ – длина волны, ω – видимый спектр, i – источник освещения, ρ – отражательная способность поверхности предмета, $\mathbf{s} = [s_r(\lambda), s_g(\lambda), s_b(\lambda)]$ – чувствительности камеры.

На практике используется дискретная форма записи линейной модели формирования:

$$\mathbf{c} = S^T \mathbf{r}, \quad (2)$$

где $\mathbf{r} = \int_{\omega} i(\lambda) \cdot \rho(\lambda) d\lambda \in \mathbb{R}^n$ – вектор измерений спектра излучения точки сцены; S – матрица чувствительностей камеры $n \times 3$.

Гипотеза, которая будет проверяться в этой работе состоит в том, что обученная на синтезированных изображениях нейронная сеть может показывать сопоставимое качество определения параметров источников освещения. Для всесторонней оценки данного подхода в работе рассматривается оба сценария: обучение алгоритма на синтезированных данных с последующей проверкой на реальных, и наоборот.

По нашим сведениям, на данный момент нет статей, которые бы исследовали возможность обучать нейросетевые алгоритмы на синтезированных цветных изображениях, полученных из гиперспектральных данных, поэтому эта работа является новой в этом вопросе.

2 Синтез данных

В этой работе будет рассмотрена симуляция камеры Canon 600D с помощью датасета Ли [6], в котором находятся 409 сцен спектральных отражательных способностей предметов 512×512 .

На рисунке 1 показана упрощенная схема синтеза трехканальных изображений из гиперспектрального.

Для каждой камеры известна чувствительность ее сенсора (использованная чувствительность для Canon 600D изображена на рисунке 2), поэтому, применив для гиперспектрального изображения и чувствительности формулу (2), можно симулировать фотографию на тестовую камеру.

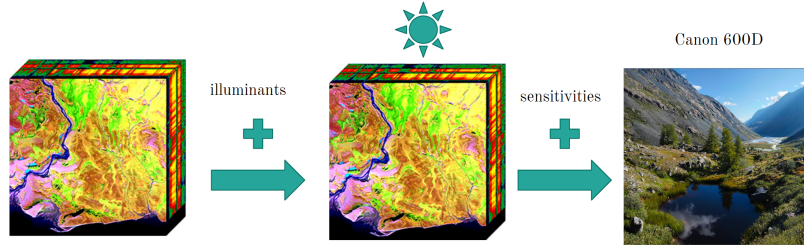


Рис. 1. упрощенная схема синтеза трехканальных изображений из гиперспектрального

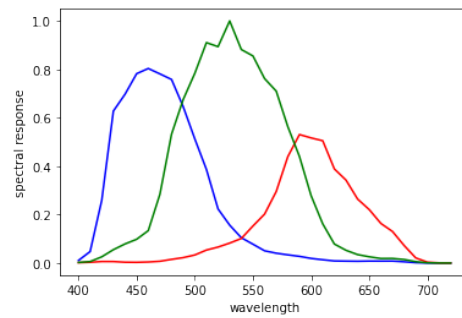


Рис. 2. Спектральные чувствительности Canon 600D.

Рассмотрим различные спектры источников освещения, 4 для сцен вне помещений и 5 для внутренних. Спектры источников освещения изображены на рисунках 3, 4. Выбранные источники сильно отличаются по максимальным значениям, а так как для синтеза данных будет применяться выпуклая комбинация источников, каждый источник нормируем так, чтобы для него выполнялось $\int_{\omega} s(\lambda) d\lambda = 1$.

Для каждой фотографии из датасета Ли выполним следующую процедуру:

1. Определим, сделана фотография в помещении или вне помещения.
2. Исходя из места фотографии сгенерируем спектр освещения, который будет произвольной выпуклой комбинацией исходных источников.
3. Перемножим гиперспектральное изображение на получившийся спектр.
4. Для каждой фотографии повторим 2 и 3 пункт, получив для каждого гиперспектрального изображения 5 фотографий.

Таким образом, из 409 гиперспектральных изображений получим датасет на 2045 изображений, на котором и будем обучать нейронную сеть.

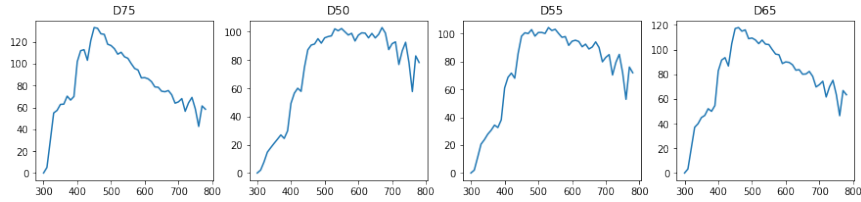


Рис. 3. Спектры источников освещения вне помещений

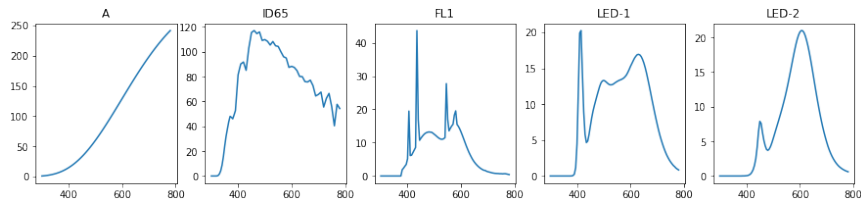


Рис. 4. Спектры источников освещения в помещении

В качестве датасета для сравнения качества обучения использован датасет SimpleCube++, состоящий из 2234 изображений 648×432 пикселей, содержащих один доминантный источник освещения. Датасет собран для решения задачи оценки цветности освещения, поэтому в нем представлены разнообразные сцены как в помещении, так и на улице. Стоит заметить, что датасет Ли тоже содержит разнообразные сцены, однако объем датасета более чем в 5 раз меньше по сравнению с SimpleCube++.

Разобьем полученный датасет на обучающую и тестовую выборку в соотношении 4 : 1, ошибку нейросети, обученной на датасете, будем проверять по тестовой выборке. SimpleCube++ в свою очередь уже поделен на две выборки.

Теперь нейронную сеть, обученную на первом датасете, можно проверить, применив модель на весь второй датасет, и наоборот.

Ответы для нашей задачи получим, перемножив спектр освещения на полученные чувствительности.

Ошибку будем измерять как угол между векторами ответа и предсказания.

3 Обучение

В качестве архитектуры для нейронной сети используется модель Color Cerberus [7], схема архитектуры представлена на рисунке 5. Единственное отличие от оригинальной модели заключается в том, что Color Cerberus определяет сразу 3 ответа на цветовой мишени, в то время как выход сети в нашем случае предсказывает только один цвет (3 числа: R, G и B).

В качестве функции минимизации будем использовать L_1 норму, в качестве оптимизатора – Adam, обучение занимало 10 эпох. Для того, чтобы понять, насколько сгенерированный набор данных репрезентативен и пригоден для обучения работающих в реальных условиях алгоритмов требуется провести двухсторонний эксперимент: обучить нейросеть на SimpleCube++, а проверить на сгенерированном датасете (что позволит убедиться как в обучаемости нейронной сети, так и в репрезентативности синтезированного набора данных), а затем провести обратный эксперимент (для имитации сценария реального использования). Результаты представлены в Таблице 1.

В таблице 1 левый столбец означает ошибку, на которую обучилась нейросеть, а правый – результат применения уже обученной сети на другом датасете.

Ошибка при обучении получилась довольно высокой, поэтому тут может иметь место недообучение в виду неоптимальных метапараметров. Также результат может отличаться вследствие выбранного метода генерации источников, которые могли получиться неестественными.

Еще одной причиной расхождения чисел могут послужить чувствительности, взятые из [8], а не измерены для конкретной камеры, на которой собирали датасет.

Из таблицы 1 видно, что нейросеть, обученная на SimpleCube++, показывает на сгенерированном датасете ошибку меньшую, чем ошибка на тестовой выборке SimpleCube++. В свою очередь нейросеть, обученная на сгенерированном датасете, показывает результат хуже на 4° на SimpleCube++. Из этого можно сделать вывод, что в датасете Ли предоставлено мало информации для полноценного обучения или же процесс генерации самих изображений недостаточно точен. В тоже время обе сети показывают одинаковую ошибку на сгенерированном датасете.

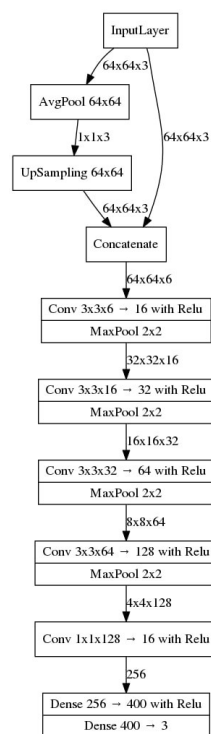


Рис. 5. Архитектура нейронной сети Color Cerberus

Таблица 1. Результаты обучения и тестирования.

	Ошибка на обученном	Ошибка на тестовом
Синтезированный датасет	5°	9°
SimpleCube++	7°	5°

Рассмотрим изображения, на которых нейронная сеть, обученная на симулированном датасете, показывает наибольшую ошибку. Ошибка более 18° появляется на изображениях, где в кадре нет цветового разнообразия (см. рисунок 6). Из этого можно сделать вывод, что нейронная сеть не находит цветовые признаки в сцене. Это может быть объяснено тем, что в датасете Ли не хватает сложных монотонных сцен, на которых мало объектов.



Рис. 6. Примеры изображений, на которых нейронная сеть дает наибольшую ошибку

4 Заключение

Исходя из полученных результатов нельзя сделать вывод, что с помощью гиперспектральных изображений можно обучить нейронную сеть для задачи цветового постоянства.

Причиной возможного недообучения может стать неправильный подбор метапараметров. Так же в различии результатов может иметь влияние метод создания освещений, который может создавать нереалистичные распределения. В завершение может иметь влияние тот факт, что чувствительности не в полной мере отражают чувствительности камеры Canon 600D.

Также в процессе изучения была замечена интересная особенность: Gray-World работает с низкой точностью (9°) на симулированных изображениях. Возможно, эта особенность появляется из нормированных чувствительностей камеры.

В следующих работах планируется обучиться на исходных источниках освещения, подобрать более оптимальные метапараметры нейронной сети, усовершенствовать алгоритм синтеза изображений.

Список литературы

- [1] Arjan Gijsenij, Theo Gevers и Joost Van De Weijer. “Computational color constancy: Survey and experiments”. В: *IEEE transactions on image processing* 20.9 (2011), с. 2475–2489.
- [2] Alban Flachot и др. “Deep neural models for color classification and color constancy”. В: *Journal of Vision* 22.4 (2022), с. 17–17.
- [3] Egor Ershov и др. “The cube++ illumination estimation dataset”. В: *IEEE Access* 8 (2020), с. 227511–227527.

- [4] Ghalia Hemrit и др. “Rehabilitating the colorchecker dataset for illuminant estimation”. В: *Color and Imaging Conference*. Т. 2018. 1. Society for Imaging Science и Technology. 2018, с. 350–353.
- [5] Firas Laakom и др. “Intel-tau: A color constancy dataset”. Англ. В: *IEEE Access* 9 (2021), с. 39560–39567.
- [6] Yuqi Li, Qiang Fu и Wolfgang Heidrich. “Dataset for multispectral illumination estimation using deep unrolling network”. В: (2021).
- [7] A Savchik, E Ershov и S Karpenko. “Color cerberus”. В: *2019 11th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA)*. IEEE. 2019, с. 355–359.
- [8] Jun Jiang и др. “What is the space of spectral sensitivity functions for digital color cameras?” Англ. В: *2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*. IEEE. 2013, с. 168–179.

Оценка качества статических алгоритмов оценки спектра освещения по гиперспектральным изображениям

Ярчук Дмитрий^{1,2}, Тесалин Василий^{1,2}, Егор Ершов¹

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия,

² Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия
iarchuk.dr@phystech.edu

Аннотация К настоящему моменту уже написаны сотни работ по оценке параметров освещения в сцене на основе трехканальных изображений, в литературе эту задачу принято называть задачей оценки освещения или, не совсем верно, задачей вычислительной цветовой константности. С повсеместным распространением систем регистрации гиперспектральных изображений аналогичный вопрос возник и для них, в контексте задачи точного восстановления параметров окрасок объектов в сцене, независимо от условий освещения. В данной работе рассматривается ряд статических алгоритмов оценки освещения на новом наборе гиперспектральных данных, собранном с использованием серого шара в качестве цветовой мишени. В результате показано, что для оценки доминантного источника освещения наибольшей точности достигает алгоритм Grey-World, средняя угловая ошибка предсказания спектра которого составила 10,3 градуса.

Ключевые слова: Гиперспектральное изображение, оценка освещения, grey-ball, статические алгоритмы, набор данных

1 Введение

В последнем десятилетии наблюдается бурный рост систем регистрации гиперспектральных изображений, к их числу относятся методы регистрации с использованием дифракционного элемента [1], методы регистрации с использованием акустооптических фильтров [2] и жидких кристаллов [3]. Вместе с этим растет интерес к обратным задачам, в которых по гиперспектральному изображению требуется решить задачу восстановления спектров окраски наблюдаемых объектов или восстановления параметров освещения в сцене. В данной работе рассматривается вторая задача.

Интересно отметить, что данная задача уже рассматривалась в научной литературе. В частности, в работе [4] с использованием мультиспектрального набора изображений Foster [5], содержащих информацию об окрасках объектов в сцене, авторы провели оценку статических алгоритмов, таких как Grey-World, Grey-Edge, Max-Spectra. Для 12-канального изображения авторы показали, что наилучшая точность достигается при использовании

алгоритма Max-Spectra. Данная задача решается также и в работе [6], авторы используют собранный ими гиперспектральный набор данных с плоской мишенью. Для оценки спектра источника освещения применяются методы глубокого обучения. В работе [7] авторами предложен собственный метод оценки спектра источника освещения. В данной работе используется 3 гиперспектральных набора данных: Foster [5], CAVE Multispectral Image Database [8] и набор изображений, собранный авторами. Точность данного метода оказалась лучше Grey-World в 2-10 раз, в зависимости от типа сцены. Существуют работы, в которых используется комбинация нескольких методов. Так в работе [9] авторы используют комбинацию статических методов, таких как Grey-World и Grey-Edge, и нейронных сетей, в данном случае это FC4 [10]. В качестве набора данных взяты [5] и [11]. Авторы показали, что максимальная ошибка у подобной комбинации меньше, чем у данных алгоритмов, применяемых по отдельности.

Несмотря на достаточно большой объем исследований по данной задаче, требуется сделать ещё несколько улучшений методологии оценки точности: использование наборов данных с естественным освещением для учитывания большого числа источников в сцене, а также использование объёмной цветовой мишени для оценки распределения параметров освещения в случае сложных сцен, смотри рисунок 1.

В данной работе предлагается следующее решение данной проблемы. Используется объёмная цветочная мишень – серый шар, а также все изображения сняты в сложных естественных сценах с неконтролируемыми условиями освещения.

Выполнена оценка точности работы статических методов на собранном наборе данных. Последний может быть использован не только для оценки доминантного источника, но и целого распределения параметров источников, освещающих сцену.

Следует отметить, что в некоторых частях работы при проверке предположений используется серый куб, а не шар. Это релевантно, поскольку в данных местах принципы работы с этими мишенями идентичны.



Рис. 1: Изображение с серым шаром

2 Методика формирования гиперспектрального набора данных для оценки освещения

В процессе формирования набора данных в качестве цветочной мишени использовался ахроматический шар. Преимуществом такого выбора является возможность оценить распределение спектров излучения пикселей на шаре,

используя которое можно детектировать несколько источников освещения в сцене и определить их спектр.

Рассмотрим принцип формирования цвета серого шара при наличии n источников освещения в сцене.

$$\bar{c} = \int_{\Omega} \bar{s}(\lambda) \cdot (\alpha_1 \cdot e_1(\lambda) + \dots + \alpha_n \cdot e_n(\lambda)) d\lambda, \quad (1)$$

где $\bar{s}(\lambda)$ – чувствительность камеры, $e_i(\lambda)$ – излучение i -го источника, α_i – коэффициент, показывающий степень освещенности пикселя i -ым источником. В случае одного источника гистограмма цветности будет представлять собой прямую, проходящую через ноль, в случае двух источников – плоскость и т.д. Легко понять, что при наличии всего трех каналов у камеры, невозможно различить ситуации, когда в сцене присутствуют 3 или более источников. Гиперспектральные изображения позволят различить большее число источников. Важно заметить, что вопрос устранения влияния вторичных источников освещения на форму гистограммы спектров серого шара остаётся за рамками данной работы.

Для подсчета спектра источника освещения в сцене используется серый шар. Для этого применяется следующая формула:

$$\frac{\sum_{i=1}^n r(x)}{n} \cdot \frac{1}{s} = e, \quad (2)$$

где $r(x)$ – излучение пикселя x , s – коэффициент отражающей способности шара. Суммирование проводится по всем пикселям изображения, которые содержат серую поверхность шара. Их число равно n .

В дальнейших исследованиях планируется проводить усреднение (и подсчет более сложных статистик) не по всей поверхности, а лишь по части, которая освещена источником.

Имеется ряд условий, которые необходимо соблюдать при сборе изображений:

1. Мишень должна быть освещена тем же источником, что и вся остальная сцена. В противном случае спектр, вычисляемый с помощью серого шара, не будет соответствовать действительному значению.
2. На изображении не должно быть засвеченных пикселей.
3. В процессе съемки не должен меняться источник освещения.
4. При кардинально новом освещении (смена естественного на искусственное или наоборот) необходимо производить калибровку на белую поверхность.

В ходе работы применялась гиперспектральная камера Specim IQ [1]. Диапазон длин волн данной камеры составляет 400-1000 нм, а всего регистрируется 204 равноширинных канала. Гиперспектральное изображение имеет разрешение 512×512 .

Установка, с помощью которой формировался набор данных, состоит из двух частей: гиперспектральной камеры на штативе и серого шара на подставке.

Текущий набор данных содержит 50 изображения: 30 сцены с естественным освещением, 10 с искусственным и 10 со смешанным освещением.



Рис. 2: Пример изображений

3 Оценка источника освещения

Значения спектра источника, посчитанные с помощью серого шара и полученные из камеры могут быть сопоставлены. Отклонение подсчитывается, как угол между векторами. Так делалось и в работе [12].

$$E(x, y) = \arccos \left(\frac{\langle x, y \rangle}{\|x\|_2 \cdot \|y\|_2} \right) \quad (3)$$

Среднее значение угла между данными спектрами на выборке из 8 фотографий равно 6.2 градусам.

Во время изучения отклонений на разных фотографиях было сделано несколько наблюдений. Засвеченные пиксели сильно увеличивают отклонение, а изображения, сделанные при естественном освещении имеют большее отклонение, чем изображения, сделанные при искусственном освещении. Предложено следующее объяснение данного факта: из-за того, что камера снимает спектр излучения, ей требуется намного больше времени, чем обычной камере, для создания одного кадра, порядка 1-3 минут. В связи с этим за время съемки при естественном освещении, возможно изменение источника за время формирования кадра.

Возможно попробовать понять, как именно спектр источника считается самой камерой. Предполагается, что применяется формула 2, где рассматриваются пиксели белой поверхности. Среднее значение угла на выборке из

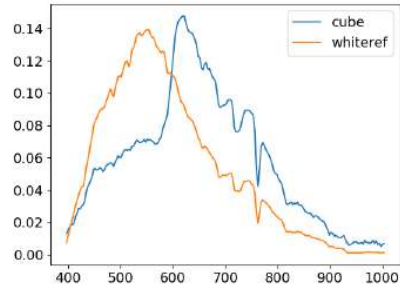


Рис. 3: Спектр для сцены, снятой при изменяющемся освещении

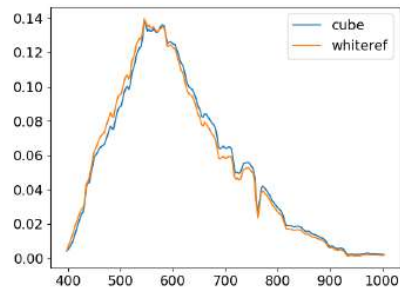


Рис. 4: Спектр для сцены, снятой при постоянном освещении

тех же 8 фотографий между вектором источника освещения, взятом из данных камеры и вектором, рассчитанным по данному предположению, равно 7.9 градусов.

4 Проверка статических алгоритмов

Для полученных изображений были проверены статические алгоритмы оценки освещения в сцене: Grey-World, Grey-Edge и Max-Spectra. Алгоритмы взяты из [13] и имеют следующие формулы.

Grey-World:

$$\frac{\sum_{i=1}^n r(x)}{n} = k_1 e \quad (4)$$

Grey-Edge:

$$\frac{\sum_{i=1}^n |r_x(x)|}{n} = k_2 e, \quad (5)$$

где суммирование происходит по всем пикселям на изображении, число которых равно n , а $r(x)$ – значение излучения в пикселе x .

Max-Spectra:

$$(\max(r_1(x)), \max(r_2(x)), \dots, \max(r_{204}(x))) = k_3 e \quad (6)$$

Каждый максимум берется по всем пикселям на изображении. В данных выражениях k_1, k_2, k_3 - некоторые константы. Подсчитывать их нет необходимости, поскольку в задаче определения спектра источника рассматриваются нормированные векторы.

Изначально возникла проблема с методом Max-Spectra. Если в сцене есть засвеченные пиксели, то в спектре полученного источника освещения будет наблюдаться плато, это показано на Рисунке 5.

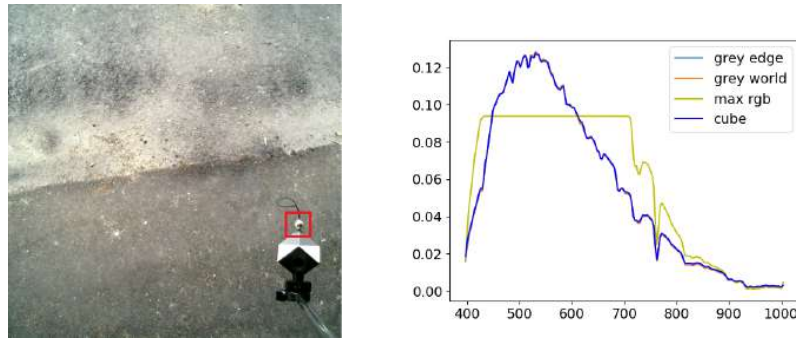


Рис. 5: Пример изображения с засвеченными пикселями

Засвеченные пиксели часто возникают на зеркальных поверхностях, такие поверхности есть, как у серого шара, так и у куба. Вследствие этого статические алгоритмы применяются к обрезанным фотографиям, на которых отсутствует мишень. Это производится еще и для оценки работы алгоритмов Grey-World и Grey-Edge, поскольку серая поверхность в сцене улучшает реальные результаты.

5 Результаты

Точность каждого статического алгоритма была посчитана для всех изображений. В таблице представлены результаты алгоритмов на 50 изображениях, полученных с использованием серого шара. Также посчитаны результаты работы статических алгоритмов в зависимости от типа источника. В полученном наборе данных имеются изображения с тремя различными типами источников: естественное освещение, искусственное и смешанное. Представлены несколько метрик, использующихся при угловой ошибке: среднее значение, медиана, среднее значение ошибки у 25% изображений с минимальной ошибкой и среднее значение ошибки у 25% изображений с максимальной ошибкой. Также представлены лучшие результаты работы алгоритмов.

	Grey-World	Grey-Edge	Max-Spectra
Все изображения			
Среднее	10.3	10.9	13.7
Медиана	8.9	9.1	10.5
Лучшие 25%	2.2	2.3	3.9
Худшие 25%	12.9	13.7	16.8
Естественное освещение			
Среднее	10.2	10.5	13.1
Медиана	7.9	9.1	9.7
Лучшие 25%	2.0	2.0	3.7
Худшие 25%	12.7	13.1	15.9
Искусственное освещение			
Среднее	9.3	10.4	13.5
Медиана	6.0	8.0	12.1
Лучшие 25%	1.9	2.1	2.8
Худшие 25%	11.4	12.8	16.6
Смешанное освещение			
Среднее	11.3	12.3	15.2
Медиана	11.4	12.6	15.6
Лучшие 25%	2.8	3.6	5.6
Худшие 25%	13.4	14.5	17.6
Лучшие результаты	1.11	0.65	0.73

Таблица 1: Результаты статических алгоритмов



(a) Изображение с лучшим результатом на алгоритмах Grey-Edge и Grey-World



(b) Изображение с лучшим результатом на алгоритме Max-Spectra

В действительности, не все сцены соответствуют предположению о том, что средняя отражательная способность сцены ахроматическая. Таким образом, разброс ошибки на статических алгоритмах можно считать показателем разнообразия набора данных. Также выявлено, что SPECIM IQ сам рассчитывает спектральную точку белого, которая отличается от вектора,

отраженного от белой поверхности. Отклонение значения камеры от истинного равно 7.9 градусов, что близко к значению ошибки алгоритма Grey-World.

6 Заключение

В работе получен гиперспектральный набор данных из 50 изображений с использованием объемной цветовой мишени, серого шара. На полученных изображениях проверены статические алгоритмы оценки освещения в сцене: Grey-World, Grey-Edge и Max-Spectra, а также описаны особенности сцен, которые влияют на ошибку алгоритмов. Также обозначены методики, которые могут быть улучшены. Лучшую точность в 10,3 градуса показывает алгоритм Grey-World. В дальнейшем планируется усовершенствовать метод вычисления оценки распределения спектров первичных источников освещения в сцене, а также применение более современных алгоритмов его оценки.

Список литературы

1. Jan Behmann, Kelvin Acebron, Dzhane Emin, Simon Bennertz, Shizue Matsubara, Stefan Thomas, David Bohnenkamp, Matheus T Kuska, Jouni Jussila, Harri Salo, et al. Specim iq: evaluation of a new, miniaturized handheld hyperspectral camera and its application for plant phenotyping and disease detection. *Sensors*, 18(2):441, 2018.
2. Витольд Эдуардович Пожар, Александр Сергеевич Мачихин, Максим Игоревич Гапонов, Сергей Вячеславович Широков, Михаил Михайлович Мазур, and Алексей Евгеньевич Шерышев. Гиперспектрометр на основе перестраиваемых акустооптических фильтров для БПЛА. *Светотехника*, (4):47–50, 2018.
3. Alex Hegyi and Joerg Martini. Hyperspectral imaging with a liquid crystal polarization interferometer. *Optics express*, 23(22):28742–28754, 2015.
4. Haris Ahmad Khan, Jean-Baptiste Thomas, Jon Yngve Hardeberg, and Olivier Laligant. Illuminant estimation in multispectral imaging. *JOSA A*, 34(7):1085–1098, 2017.
5. David H Foster, Kinjiro Amano, Sérgio MC Nascimento, and Michael J Foster. Frequency of metamerism in natural scenes. *Josa a*, 23(10):2359–2372, 2006.
6. Yuqi Li, Qiang Fu, and Wolfgang Heidrich. Multispectral illumination estimation using deep unrolling network. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pages 2672–2681, 2021.
7. Tong Su, Yu Zhou, Yao Yu, Xun Cao, and Sidan Du. Illumination separation of non-lambertian scenes from a single hyperspectral image. *Optics express*, 26(20):26167–26178, 2018.
8. Fumihito Yasuma, Tomoo Mitsunaga, Daisuke Iso, and Shree K Nayar. Generalized assorted pixel camera: postcapture control of resolution, dynamic range, and spectrum. *IEEE transactions on image processing*, 19(9):2241–2253, 2010.
9. Youngha Chang, Takuya Iiyama, and Nobuhiko Mukai. Combination of statistics and deep learning-based illumination estimation methods. *OSA Continuum*, 4(11):2936–2948, 2021.

10. Yuanming Hu, Baoyuan Wang, and Stephen Lin. Fc4: Fully convolutional color constancy with confidence-weighted pooling. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pages 4085–4094, 2017.
11. Sérgio MC Nascimento, Flávio P Ferreira, and David H Foster. Statistics of spatial cone-excitation ratios in natural scenes. *JOSA A*, 19(8):1484–1490, 2002.
12. Dongliang Cheng, Brian Price, Scott Cohen, and Michael S Brown. Effective learning-based illuminant estimation using simple features. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pages 1000–1008, 2015.
13. Joost Van De Weijer, Theo Gevers, and Arjan Gijsenij. Edge-based color constancy. *IEEE Transactions on image processing*, 16(9):2207–2214, 2007.

Поиск спектральных фильтров для улучшения восстановления гиперспектральных изображений

Даниил Реутский^{1,2}, Егор Ершов²

¹ Московский физико-технический институт (НИУ)

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
reutskij.da@phystech.edu

Аннотация По RGB-откликам камеры можно приблизительно восстанавливать исходный спектр освещённости в каждом пикселе. Качество восстановления может быть улучшено при помощи спектральных фильтров. Если взять не один фильтр, а четыре и сделать с каждым из них снимок одной и той же сцены, то полученный набор данных будет по сути 12-канальной фотографией. Сейчас такой сценарий съёмки уже возможен с использованием современных мобильных телефонов. В данной работе показано, что такой прирост информации даёт возможность реконструировать спектральную информацию в 4 раза точнее.

Введение

Спектральные фильтры могут использоваться для улучшения цветковых характеристик камер [1], а также для гиперспектральной съёмки. Последнее наиболее надёжно осуществляется при помощи дорогостоящих гиперспектральных камер, позволяющих получить многоканальные изображения с шириной полос 1 нм в диапазоне от 400 до 1100 нм.

Гиперспектральная съёмка широко используется в геологии, агропромышленности, сортировке отходов и прочее, поскольку позволяет делать выводы о химическом составе объекта съёмки. По этой же причине есть и применения в повседневной жизни: например, для медицинских целей или для передачи информации о краске стены для ремонта.

Менее точные методы получения таких изображений могут заключаться в восстановлении спектров по трём каналам, т. е. по изображению с обыкновенной RGB-камеры. Спектральные характеристики камеры можно изменить при помощи фильтров, и тогда точность восстановления изменится. Можно и вовсе попытаться приблизиться по качеству к гиперспектральным камерам: для этого можно закрепить обыкновенную камеру на штативе и сделать несколько фотоснимков с поочерёдным применением нескольких узкопропускающих фильтров, в совокупности покрывающих видимый диапазон. Недостаток такого подхода виден — это и обязательная неподвижность

объектива с объектом съёмки, и длительность процесса, и возможная дороговизна фильтров с узким диапазоном пропускания.

Ситуацию можно изменить, используя несколько камер одновременно, разместив на каждой из них свой фильтр. Этим уберётся проблема штатива и длительности съёмки, однако возникнет параллакс и задача о сопоставлении изображений. Также можно уточнить, действительно ли нужны именно узкопропускающие фильтры. Какими вообще должны быть фильтры, чтобы информация о спектре с наилучшей точностью восстанавливалась из цветowych откликов камеры? Этому второму вопросу и посвящена данная работа (с прицелом на то, что будет найдено и решение первой задачи о параллаксе).

Схожие исследования встречаются в научной литературе. Финлейсон и соавт. [1] ищут фильтр, чтобы сделать камеру более колориметрической, т. е. схожей со зрительной системой человека. Для этого они аналитически подбирают функцию пропускания, накладывая на её вторую производную ограничение сверху по модулю. Смысл ограничения в том, чтобы был шанс дёшево изготовить нужный фильтр в реальной жизни.

Гиперспектральные изображения восстанавливаются в работе Валеро и соавт. [2]. Их метод состоит в съёмке одной и той же сцены сначала без фильтра, а затем с двумя поочерёдно. Таким образом, восстановление спектра ведётся по девяти каналам. Фильтры берутся среди шести заранее выбранных, и задача сводится к перебору небольшого количества комбинаций.

Ду-Йонг и соавт. [3] тоже снимали 9-канальные картинки при помощи двух фильтров, но ищут последние не перебором, а разрабатывают математический аппарат для аналитического поиска. Ограничения на функции пропускания — вновь верхний предел модуля второй производной.

В нашей работе сочетаются лучшие качества упомянутых статей. Наша мотивация исходит из того, что в перспективе устройство для измерения спектра можно будет получить, надев на смартфон с четырьмя камерами чехол, прикрывающий каждую из камер отдельным фильтром. Тем самым мы сможем получать 12-канальные изображения, из которых и будем извлекать информацию о спектре. Искать нужные функции пропускания мы будем аналитически и при помощи методов оптимизации, не забыв про ограничения на фильтры.

Постановка задачи

Спектр излучения представим в упрощённом виде — в виде вектора — если зафиксировать диапазон длин волн и шаг дискретизации. Обозначим за R матрицу $k \times n$, составленную из спектров, взятых из всех гиперспектральных изображений тренировочного датасета, k — число каналов, n — число пикселей. RGB-отклики камеры можно симулировать выражением $C = SR$, где S — матрица чувствительности камеры размеров $3 \times k$. Но мы применяем 4 различных фильтра, поэтому вектор откликов приобретает размерность 12. Фильтры обозначим матрицей $F : 4 \times k$. Чтобы симулировать нужные

отклики, каждую строку S нужно поканально умножить на каждую строку F и получить матрицу размеров $12 \times k$, и уже её использовать вместо S . Эту операцию обозначим знаком \circ . Итак, отклики камеры даются выражением

$$C = (S \circ F)R. \quad (1)$$

Из откликов камеры требуется восстановить спектры. Задача кажется некорректной, ведь каждому отклику, вообще говоря, соответствует бесконечное число спектров, которые могли его дать (метамеры). Однако практика показывает, что спектры сцен из окружающего мира покрывают отнюдь не всё k -мерное пространство. Арад и соавт. [4] упомянули, что естественные спектры лежат на маломерном многообразии, а относительная частота метамеров обычно не превышает 10^{-4} . Поэтому даже простейшие методы восстановления спектров, например, метод наименьших квадратов (МНК), могут давать приемлемые результаты.

Тем, как МНК восстанавливает спектры, мы и будем пользоваться как критерием оптимальности фильтра. Пусть M — матрица размеров $k \times 12$, переводящая отклики камеры обратно в спектры и подбираемая одновременно с F . Тогда восстановленные спектры выражаются как

$$\hat{R} = MC = M(S \circ F)R. \quad (2)$$

Ставится задача о минимизировании $\|\hat{R} - R\|_2^2$ при различных M и F . Здесь и далее норма матриц понимается не как операторная, а в поэлементном смысле. Требования от F — диапазон элементов от 0 до 1 и ограниченность «второй производной». В качестве аналога последней в дискретном случае мы используем разностную схему

$$f''(x) \approx \frac{1}{h^2}(f(x+h) + f(x-h) - 2f(x)) \quad (3)$$

и с помощью строкового преобразования

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ -2 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & -2 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

получаем из матрицы фильтров матрицу вторых производных функций пропускания: FD . Итого задача оптимизации ставится так:

$$\begin{aligned} \min_{M,F} \quad & \|M(S \circ F)R - R\|_2^2 + \lambda \|FD\|_2^2 \\ \text{s. t.} \quad & F \in \mathbb{R}_+^{4 \times k} \end{aligned} \quad (5)$$

где λ — какое-то положительное число. Регуляризационный член и ограничение помогают удовлетворить требованиям на F . Не соблюдено лишь

требование на ограниченность сверху единицей, но этого можно достичь после оптимизации, поделив F на нужное число и домножив M на то же самое число.

Источники данных

Li и соавт. [5] в 2021 году представили набор данных из 409 гиперспектральных indoor- и outdoor-изображений разрешения 512×512 с 34 спектральными каналами от 400 до 730 нм с шагом 10 нм. Он содержит спектральные освещённости сенсора фотоаппарата, а приблизительные отражательные способности сцен. Это позволяет симулировать новые гиперспектральные изображения тех же сцен, но под другим источником света. Таким образом, мы из 409 изображений получили 1636, используя для каждой картинке 4 стандартных источника: A18, F2, D65, E (рис. 1).

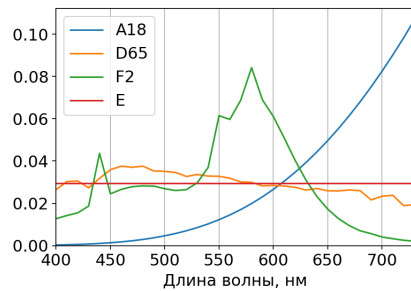


Рис. 1. Используемые источники освещения

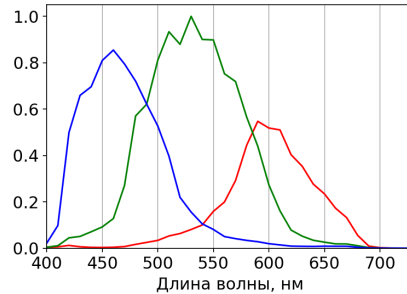


Рис. 2. Спектральные чувствительности камеры Canon 60D

Все пиксели всего набора не уместятся в оперативную память, поэтому из каждой картинке пиксели брались с шагом 12 по горизонтали и вертикали. Разделение на тренировочную и тестовую части бралось в отношении 4:1.

Чтобы проверить полученные фильтры на «переобучённость», был добавлен второй тестировочный набор данных — NTIRE2020 [6]. Он содержит 450 outdoor-изображений разрешения 512×482 с 31 спектральными каналами (до 700 нм). На этот раз даны именно спектральные освещённости сенсора. Таким образом, набор содержит более однообразные данные, и именно поэтому был выбран в качестве тестового. По аналогии с набором данных Li, для экономии оперативной памяти пиксели брались из сетки с шагом 7.

Для симуляции работы камеры использовались чувствительности Canon 60D (рисунок 2) [7].

Способ оптимизации

При фиксированном F выражение для оптимального M даётся в виде решения обыкновенной линейной регрессии:

$$M^* = RC^T(CC^T)^{-1}, \quad (6)$$

где C подставляется из (1). Для подбора F было решено использовать оптимизатор Adam из пакета PyTorch, хорошо зарекомендовавший себя для невыпуклых задач. Шаг оптимизации F чередовался с перерасчётом M по выражению (6).

Adam не поддерживает оптимизацию с ограничениями, поэтому после каждого шага оптимизации матрицы F отрицательные элементы последней заменялись на нули явно.

Для ускорения была придумана следующая методика. В ходе оптимизации очень часто вычисляется целевая функция задачи (5). Преобразуем её, используя сингулярное разложение R , а также тот факт, что ортогональное преобразование не меняет 2-норму:

$$\|(M(S \circ F) - I)R\|_2^2 = \|(M(S \circ F) - I)U\Sigma V^T\|_2^2 = \|(M(S \circ F) - I)U\Sigma\|_2^2. \quad (7)$$

Заметим теперь, что $U\Sigma$ имеет те же размеры, что и R , однако последние $n - k$ столбцов (порядка миллионов) нулевые и не влияют на значение выражения. Значит, $U\Sigma$ можно обрезать до размеров $k \times k$. Теперь в конце подсчёта целевой функции и её градиентов не нужно осуществлять умножение больших матриц. Поскольку в процессе оптимизации R не меняется, сингулярное разложение можно предподсчитать. На практике такой подход позволил ускорить оптимизацию в 100 раз.

Оценка качества

После подбора M и F на тренировочном наборе данных вычислялась следующая метрика качества восстановления спектров

$$\alpha(R, \hat{R}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \arccos \frac{\langle r_i, \hat{r}_i \rangle}{\|r_i\|_2 \|\hat{r}_i\|_2}, \quad (8)$$

где R и \hat{R} — спектры уже из тестового набора данных.

Чтобы лучше осознать качество полученных фильтров, мы не просто подсчитаем метрику, а сравним её с некоторыми baseline-решениями для F . А именно,

- *No filters.* $F \equiv 1$;
- *Random.* Элементы F сгенерированы из $\mathcal{N}(1, 0.01)$;
- *Manual.* См. рисунки 3 и 4,

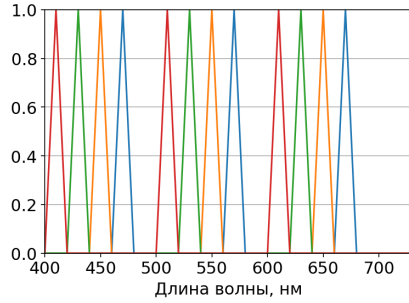


Рис. 3. Фильтры, представляющие *manual*-стратегию. 4 цвета обозначают 4 фильтра.

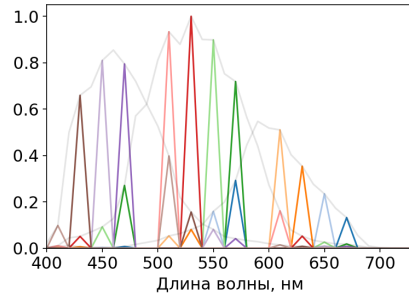


Рис. 4. Чувствительности полученного прибора (12 линий). Светлые линии — чувствительности камеры.

где $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$ — нормальное распределение.

Мотивация стратегии *manual* — добиться того, чтобы чувствительности полученного прибора были похожи на узкопропускающие. Так можно добиться более явного 12-мерного представления исходного спектра.

Результаты

Фильтры, полученные в результате оптимизации, назовём *trained*. Их функции пропускания показаны на рисунке 5.

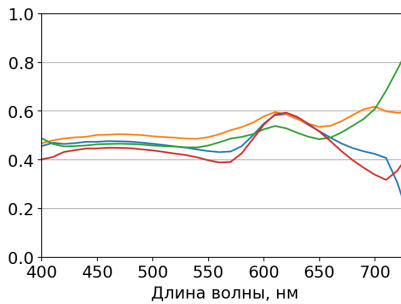


Рис. 5. Фильтры, полученные в результате оптимизации

Видно, что в левой половине видимого диапазона фильтры отличаются мало, а в правом конце наоборот, начинают расходиться. Можно предположить, что это связано с малой чувствительностью камеры на длинных волнах, а поскольку за неправильно угаданный спектр мы «штрафовали»

равномерно по всему диапазону, оптимизация фильтров помогает скомпенсировать данный недостаток камеры.

Результат сравнения подходов на обоих тестовых наборах данных представлен в таблице 1.

Датасет	Trained	Manual	Random	No filters
Li, тест	2.81	9.31	10.49	20.51
NTIRE2020	5.22	3.19	3.67	13.58

Таблица 1. Метрики (8) для различных наборов фильтров. Меньше — лучше. Единица измерения — градус.

Выводы

Как и следовало ожидать, любые фильтры дают улучшения в качестве восстановления спектров. Причём даже малые изменения в функции пропускания могут привести к большому приросту точности (отличие *random* от *no filters*). По доминированию *trained*-стратегии на строчке с набором данных Li можно было бы сделать вывод, что основная информация о спектрах лежит на правом конце видимого диапазона. Сравнение с NTIRE2020 показывает, что это связано с особенностью тренировочного набора данных и не является каким-либо универсальным законом.

Дальнейшая работа

Предстоит выяснить, какая именно особенность датасета Li приводит к формированию фильтров с «концевыми особенностями», и таким образом усилить требования к обучающему набору данных. Также стоит учесть, что в формировании реальных RGB-изображений всегда участвуют шумы, которые могут помешать качеству восстановления спектров. Будущие симуляции нужно проводить с участием шумов.

Нам удалось пронаблюдать по метрикам, как меняется качество восстановления спектров, но у нас не было метрики для оценки отличия именно наборов фильтров друг от друга. Мы нацелены более детально пронаблюдать зависимость качества восстановления от изменения фильтров — а для этого надо научиться «мерить» последнее.

Более отдалённая перспектива — конструирование гиперспектрального прибора из смартфона с 4 камерами — предполагает решение проблемы параллакса и учёт того, что настоящие спектральные характеристики камер могут быть неизвестны.

Список литературы

1. Graham D. Finlayson and Yuteng Zhu. Designing color filters that make cameras more colorimetric. *IEEE Transactions on Image Processing*, 30:853–867, 2021.
2. E. Valero, Juan Nieves, Sérgio Nascimento, Kinjiro Amano, and David Foster. Recovering spectral scenes with an rgb and colored filters data from natural digital camera. *Color Research and Application*, 32:352–360, 2007.
3. Du-Yong Ng and J.P. Allebach. A subspace matching color filter design methodology for a multispectral imaging system. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(9):2631–2643, 2006.
4. Boaz Arad and Ohad Ben-Shahar. Sparse recovery of hyperspectral signal from natural rgb images. In Bastian Leibe, Jiri Matas, Nicu Sebe, and Max Welling, editors, *Computer Vision – ECCV 2016*, pages 19–34, Cham, 2016. Springer International Publishing.
5. Yuqi Li, Qiang Fu, and Wolfgang Heidrich. Multispectral illumination estimation using deep unrolling network. pages 1–8, 2021.
6. Boaz Arad, Radu Timofte, Ohad Ben-Shahar, Yi-Tun Lin, Graham Finlayson, Shai Givati, and Others. Ntire 2020 challenge on spectral reconstruction from an rgb image, 2020.
7. Rochester Institute of Technology. Camera spectral sensitivity database. <http://www.gujinwei.org/research/camspec/db.html>, 2013.

Определение оптимальных спектральных чувствительностей мультиканального сенсора в задаче оптической сортировки картофеля

Иван Ермаков^{1,2}, Егор Ершов^{1,2}

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия,

² Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия
ermakov.ia@phystech.edu

Аннотация Работа посвящена вопросу разработки автоматических систем оптической сепарации картофеля. Из-за дороговизны гиперспектральных камер встаёт вопрос об оптимизации стоимости производства путём использования для классификации обычных камер с небольшим числом каналов. В работе предложен метод выбора оптимальной чувствительности сенсора для решения задачи классификации картофеля на два класса («хороший», «плохой») с использованием оптических систем. Идея метода заключается в том, чтобы использовать классификатор SVM для того, чтобы оценивать качество данных, получаемых линейным преобразованием из исходных гиперспектральных данных. Данный подход применим в более общем виде к задаче о наилучшем понижении размерности для решения задачи классификации.

В работе получены теоретические результаты, в том числе доказано, что существует двухканальный сенсор, который для задачи бинарной классификации с использованием SVM работает точно так же, как многоканальный сенсор, а именно, гиперспектральная камера. Также исследован конкретный датасет картофеля и подобраны спектральные чувствительности для него. Точность классификации с использованием смоделированной спектральной чувствительности составила 99%(по метрике ассигасу).

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, SVM, задача классификации, оптическая сортировка, спектральная чувствительность

1 Введение

В современном мире задачи классификации с использованием оптических сенсоров получают всё большее распространение. В качестве примера можно привести задачи классификации овощей на сорта (первый, второй, некондиция) для продажи в магазины, а также классификацию отходов для их последующей сортировки.

Оставаясь в рамках одного диапазона, как правило, чем больше канальность сенсора, тем больше информации можно получить об объекте,

а значит, тем лучше можно решать задачу классификации. Таким образом, лучшим сенсором для рассматриваемого применения является гиперспектральная камера. Однако на пути к непосредственному применению таких устройств стоит их высокая стоимость. Кроме того, зачастую их характеристики, такие, как частота кадров в секунду и разрешение, являются недостаточными. В связи с этим возникает задача построения оптимальных спектральных чувствительностей, которые бы позволили с достаточной точностью решать наши задачи, при этом обладая более низкой стоимостью или лучшими характеристиками.

Проблема построения оптимальной чувствительности сенсора рассматривалась в нескольких статьях. Одним из направлений стал подход, основанный на теории информации, развитый в работах [1], [2]. В работе [2] исследована крайне схожая с тематикой настоящего исследования проблема: выбор оптимальных спектральных чувствительностей камеры для оптической сортировки яблок. В качестве меры качества чувствительности использовалась дивергенция Кульбака-Лейблера между двумя классами. Другой особенностью является использование в качестве спектральных функций гауссиан

$$f(\lambda) = A \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{w_i}\right), \quad (1)$$

где λ_i и w_i определяют положение и ширину фильтра, а A — нормировочный множитель.

Другими известными методами для решения подобных задач являются PLS (partial least squares), CDA (canonical discriminant analysis) и NDVI (normal difference vegetation index). Описания методов PLS и CDA легко найти в соответствующей литературе. Индекс NDVI обычно используется для анализа аэрофотоснимков, однако в работе [2] он был применён к задаче классификации листьев.

Особенностью предложенного в данной работе метода является использование функций чувствительности произвольной формы, а также использование в качестве метрики зазора SVM классификатора. Проблема классификации гиперспектральных изображений с использованием SVM поднималась в работах [3], [4], однако в них не была исследована возможность уменьшения числа каналов сенсора.

2 Методика

Метод SVM (Support vector machine, метод опорных векторов) заключается в использовании для классификации следующей функции потерь:

$$L = \lambda \|w\|_2^2 + \sum_i \max(0, 1 - y_i \langle w, x_i \rangle) \rightarrow \min_w \quad (2)$$

Здесь $y_i \in \{-1, 1\}$ — предсказываемые классы модели, x_i — вектора признаков, w — обучаемые параметры модели, называемые весами.

Как известно, метод опорных векторов максимизирует расстояние между точками двух классов. За это отвечает первое слагаемое в формуле (2). Второе слагаемое штрафует модель за неверную классификацию объектов: в реальных задачах, как правило, классы не являются линейно разделимыми, и абсолютно точная классификация линейной моделью невозможна.

В рассматриваемой задаче вектора признаков x_i являются интенсивностями света в каналах гипотетической камеры, чувствительности которой мы пытаемся предсказать. Они существуют не сами по себе, а получаются из падающих излучений s_i посредством линейного преобразования $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$, где n — число каналов моделируемой камеры, $m = 204$ — число каналов гиперспектральной камеры. Тогда функция потерь представима в виде

$$\begin{aligned} L &= \lambda \|w\|_2^2 + \sum_i \max(0, 1 - y_i \langle w, A s_i \rangle) = \\ &= \lambda \|w\|_2^2 + \sum_i \max(0, 1 - y_i \langle A^* w, s_i \rangle) \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $A^* = A^T$ — сопряжённый оператор. В таком случае задача распадается на две.

1. Произвести обучение классификатора SVM и получить вектор весов u .
2. Для вектора u весов найти матрицу $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$ и вектор w , такие, что $u = A^T w$.

Первая задача хорошо исследована, например, в работах [3], [4]. Поэтому основной интерес представляет вторая задача.

Очевидно, она имеет решение. Так, если $n = 1$, то w — скаляр, A^T — вектор, и множество решений очевидно: например, положим $w = 1$, $A^T = u$. Аналогично при $m < n$ положим первый столбец матрицы A^T равным u , остальные 0, а $w = (1, 1, \dots, 1)$.

Данное рассуждение показывает, что *любая классификация для линейной модели может быть повторена в точности после линейного преобразования данных в правильно выбранное подпространство*. Это, конечно, верное рассуждение, однако на самом деле оно не решает поставленную проблему: на самом деле главной проблемой являются *отрицательные веса* модели. Действительно, физические спектральные чувствительности не могут быть отрицательны, поскольку они соответствуют вероятностям поглощения фотона с данной длиной волны [1]. Поэтому правильно поставленная задача звучит так: для вектора $u = A^T w$ весов необходимо найти матрицу $A \in \mathbb{R}_+^{n \times m}$ и вектор w , такие, что $u = A^T w$.

Обратите внимание, что теперь матрица A состоит только из неотрицательных значений. Эта задача известна как задача неотрицательного матричного разложения. Есть, правда, одно отличие: в NMF все три матрицы считаются неотрицательными; в нашем же случае, очевидно, веса u и w отрицательными быть могут.

Исследуем возможность такого разложения для различного числа каналов в полученном сенсоре. Для одноканального сенсора такое разложение,

вообще говоря, невозможно. Оно возможно только в том случае, если вектор u состоит из неотрицательных значений. В таком случае конструкция для матрицы A была описана выше. Оказывается, верна следующая

Теорема 1 Для любого $u \in \mathbb{R}^m$, у которого есть отрицательные значения, существует разложение

$$u = Fw \quad (4)$$

такое, что $F \in \mathbb{R}_+^{m \times 2}$, $w \in \mathbb{R}^2$

Пусть мы решили задачу классификации с линейным классификатором, используя спектры. Это задаёт оценку сверху на качество, которое можно получить, меняя число каналов камеры, но используя такой классификатор. Теорема 1 утверждает, что уже для двух каналов существует сенсор, для которого такая оценка качества достигается.

Напомним, что если отрицательных компонент в u нет, то достаточно одного канала.

Доказательство. Построим конструктивное доказательство. Такое разложение даётся, например, формулами

$$\begin{aligned} F &= (a \ b) \\ w &= (1 \ -1)^T \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь F — блочная матрица из векторов $a, b \in \mathbb{R}^m$, и пусть $\Delta = \min(u) < 0$ — минимальный элемент вектора u :

$$\begin{aligned} a &= u - \Delta \cdot 1_m \\ b &= -\Delta \cdot 1_m \end{aligned} \quad (6)$$

где 1_m — вектор из m единиц.

Проверяем:

$$Fw = a - b = u - \Delta \cdot 1_m + \Delta \cdot 1_m = u \quad (7)$$

При этом все элементы a и b больше либо равны 0. Иными словами, любой вектор в конечномерном пространстве может быть представлен в виде разности двух векторов с неотрицательными значениями. \square

При этом несложно заметить, что при таком разложении большая чувствительность соответствует большим компонентам в векторе весов гиперспектральной модели.

3 Датасет

Датасет для обучения состоял из гиперспектральных снимков картофеля, снятых в диапазоне 400–1000 нм (рисунок 3). Съёмки производились при помощи камеры Specim IQ.

У полученных снимков 204 спектральных канала, что позволяет с хорошей точностью моделировать чувствительности любой камеры.

Для обучения были выбраны 2 класса картофеля: хороший и плохой. В плохой класс были отнесены участки картофеля с зеленью и гнилью. Спектр в каждой точке изображения перед использованием был нормирован на интеграл. Далее спектры сохранялись в базу данных. Всего из 30 хороших картофелин и 15 плохих получилось 138885 спектров для хорошего картофеля и 22773 для плохого.

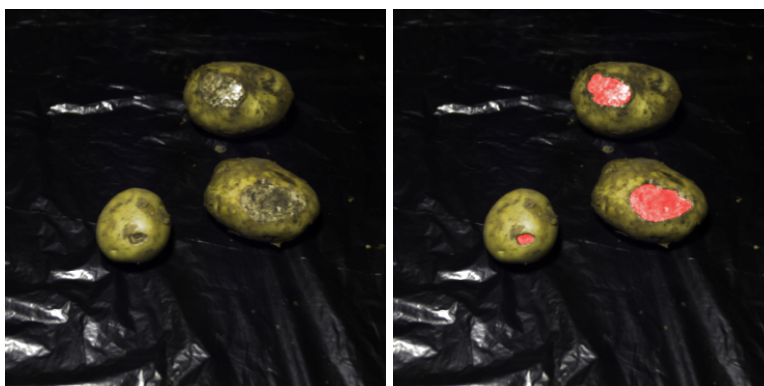


Рис. 1. Фотографии картофеля, сделанные на гиперспектральную камеру и синтезированные с использованием чувствительностей человеческого глаза CIE XYZ. На правой фотографии показана разметка гнилой области, использованная для обучения модели.

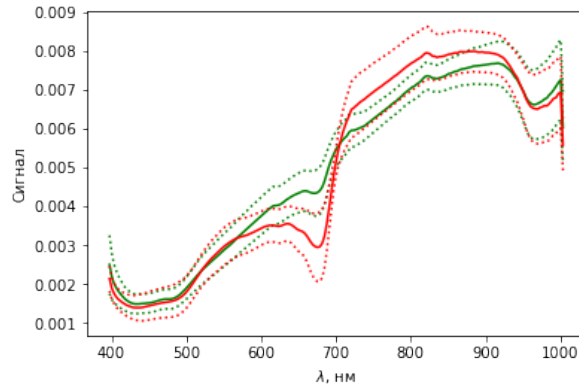


Рис. 2. Спектры представителей двух классов картофеля. Красным цветом выделен средний спектр дефектных областей, а зелёным — здорового картофеля. Линиями из точек выделено одно стандартное отклонение от среднего.

4 Результаты

SVM классификатор был обучен на 80% выборки, а затем протестирован на оставшихся 20%. В результате его точность (ассурасу) составила 99%, а матрица совпадений (confusion matrix) представлена в таблице 1.

	predicted 0	predicted 1
gt = 0	4316	284
gt = 1	119	27613

Таблица 1. Результаты классификации картофеля по гиперспектральному снимку, используя классификатор SVM. Число в ячейке i по вертикали и j по горизонтали означает количество случаев, когда для объекта класса i был предсказан класс j . При этом класс 1 — здоровый картофель, класс 0 — больной картофель.

	predicted 0	predicted 1
gt = 0	3303	1240
gt = 1	125	27664

Таблица 2. Результаты классификации картофеля по зашумлённому гиперспектральному снимку, используя классификатор, обученный на зашумлённых данных. Число в ячейке i по вертикали и j по горизонтали означает количество случаев, когда для объекта класса i был предсказан класс j . При этом класс 1 — здоровый картофель, класс 0 — больной картофель.

То есть модель испытывает сложности с выделением больных участков картофеля, а именно, для многих больных участков она предсказывает, что они здоровы. Тем не менее, точность модели на обоих классах высока.

Далее, используя (5), были вычислены оптимальные чувствительности камеры, смотри рисунок 3. Видно, что у неконстантной чувствительности

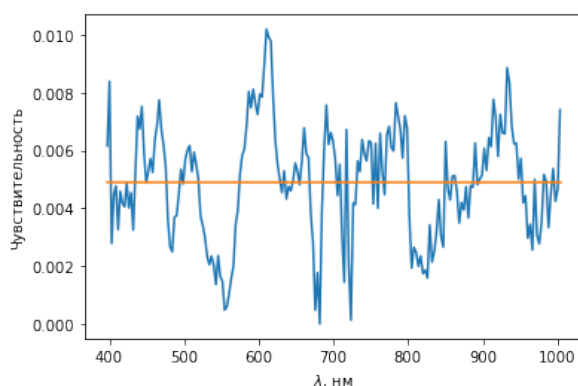


Рис. 3. Вычисленная оптимальная чувствительность двухканального сенсора

есть два пика, в области 600 нм и в области 900–1000 нм. Поскольку основными дефектами картофеля в датасете являются зелень (хорошо видна в районе около 600 нм) и гниль (видна в ближней ИК области), такая чувствительность хорошо согласуется с существующими представлениями.

Кроме того, классификатор был обучен с зашумлёнными данными. Для этого в спектры был добавлен шум с постоянным $\text{SNR} = 10$. Результаты классификации им зашумлённых данных (таблица 2) свидетельствуют о том, что в таком случае двух каналов у сенсора недостаточно. Интересен вопрос о том, как зависит качество от числа каналов в таких условиях.

5 Заключение

В работе представлен метод для оценки оптимальной спектральной чувствительности сенсора для классификации. Была доказана теорема, согласно которой для любой линейной модели задачи классификации существует двухканальный сенсор, при помощи которого её можно решить так же, как по гиперспектральному снимку. Были получены формулы, описывающие построение оптимальной чувствительности, и получен её численный вид для рассматриваемого датасета картофеля. Точность (accuracy) классификации с использованием смоделированных чувствительностей составила 99%.

Дальнейшие исследования можно проводить в области приближения оптимальной чувствительности гладкими спектрами. В таком случае двухканальный сенсор будет неоптимален по точности приближения и можно будет исследовать в том числе приближение трёхканальными сенсорами. Также

представляет интерес вопрос, сколько каналов в сенсоре нужно для того, чтобы эффективно бороться с шумами на изображении.

Список литературы

- [1] L. Benoit, É. Belin, D. Rousseau и F. Chapeau-Blondeau. «Information-theoretic modeling of trichromacy coding of light spectrum». В: *Fluctuation and Noise Letters* 13.04 (2014), с. 1450025 (цит. на с. 2, 3).
- [2] L. Benoit, R. Benoit, É. Belin, R. Vadaine, D. Demilly, F. Chapeau-Blondeau и D. Rousseau. «On the value of the Kullback–Leibler divergence for cost-effective spectral imaging of plants by optimal selection of wavebands». В: *Machine Vision and Applications* 27 (июль 2016). DOI: 10.1007/s00138-015-0717-7 (цит. на с. 2).
- [3] F. Melgani и L. Bruzzone. «Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines». В: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42.8 (2004), с. 1778–1790. DOI: 10.1109/TGRS.2004.831865 (цит. на с. 2, 3).
- [4] S. Ding и L. Chen. «Classification of Hyperspectral Remote Sensing Images with Support Vector Machines and Particle Swarm Optimization». В: *2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science*. 2009, с. 1–5. DOI: 10.1109/ICIECS.2009.5363456 (цит. на с. 2, 3).

Исследование влияния ошибок оценки канала на настройку реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей в системах ММО*

Пойда А.И.^{1,2}, Ендовицкий Е.О.^{1,2}, Куреев А.А.^{2,3}

{poyda, endovitskiy, kureev}@wireless.iitp.ru

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

³ Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики

Аннотация В современном мире постоянно растут требования к скорости передачи данных. В связи с этим разрабатываются новые технологии, которые повышают производительность сетей. Одним из многообещающих подходов являются реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (англ.: Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS). RIS представляет собой метаповерхность, состоящую из множества элементов, которые позволяют изменять амплитуду и фазу отраженной электромагнитной волны. Для корректной работы RIS необходимо проводить оценку канала между передатчиком (TX) и приемником (RX). Существует два подхода: оценка отдельных каналов TX-RIS и RIS-RX (*сепаратный* канал) и оценка общего канала TX-RIS-RX (*каскадный* канал). В отличие от оценки каскадного канала, большинству методов оценки сепаратного канала требуется наличие сенсорных элементов на RIS (полупассивный RIS), что повышает его стоимость и энергопотребление. Не менее важной задачей является настройка RIS. Существующие алгоритмы настройки в многоантенных системах используют информацию о сепаратном канале, хотя для большинства методов его оценки требуется полупассивный RIS. В связи с этим, в данной работе проводится адаптация алгоритма настройки RIS под каскадный канал. Кроме того, с помощью адаптированного алгоритма изучается влияние ошибок оценки канала на пропускную способность системы.

Ключевые слова: реконфигурируемые интеллектуальные поверхности, ММО, оптимизация

* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

1 Введение

В современном мире постоянно растет количество технологий, для которых необходимы низкая задержка и высокая скорость передачи данных. Подобные требования присутствуют, например, в технологиях виртуальной/дополненной реальности и Интернета Вещей. Для обеспечения необходимого качества обслуживания по всему миру внедряются сотовые сети пятого поколения (5G). Однако уже сейчас ведутся исследования для систем связи следующего поколения (6G), в которых требования к пропускной способности, надежности и задержке станут еще более строгими [1]. Применяющиеся в системах 5G технологии, такие как передача сигнала в миллиметровом диапазоне (mmWave) и многоантенные системы (MIMO), в основном используются на передающей и приемной сторонах. Их целью является обеспечение работы сетей в канале с неблагоприятными условиями. Новым и многообещающим подходом являются реконфигурируемые интеллектуальные поверхности благодаря способности конфигурировать беспроводной канал. Это дает дополнительные возможности для проектирования систем 6G. Кроме того, технология RIS предполагает крайне низкие энергозатраты, что также согласуется с требованиями сетей следующих поколений.

RIS является метаповерхностью, представляющей собой двумерную матрицу из большого числа пассивных отражающих элементов. В качестве отражающих элементов могут быть использованы PIN-диоды [2] или варикапы [3]. При помощи управляющего контроллера для каждого элемента независимо от других настраивается отражающий коэффициент. Это позволяет изменять фазу и амплитуду падающей электромагнитной волны, и при соответствующей конфигурации отражающих элементов, отраженный от RIS сигнал способен распространяться в среде в направлении пользователя.

Для достижения высокой производительности систем с поддержкой RIS необходимо обладать точной информацией о состоянии канала (англ.: Channel State Information, CSI). На практике процедура оценки CSI в системах с RIS является сложной задачей, в связи с тем, что технология подразумевает использование большого количества отражающих элементов, которые в общем случае обладают различными канальными условиями и, соответственно, различными коэффициентами отражения. Это значительно увеличивает длительность процедуры оценки CSI. И хотя на данный момент нет общепринятых алгоритмов оценки CSI, уже можно выделить два основных направления: оценка **сепаратного** канала, оценка **каскадного** канала [4].

Алгоритмы оценки каскадного канала подразумевают, что RIS обладает только отражающими элементами (полностью пассивный RIS). Такой подход в общем случае не позволяет разделить оценить каналы TX-RIS и RIS-RX. Вместо этого может быть оценен лишь каскадный канал TX-RIS-RX на одном конечном узле (TX или RX) [5–9]. Необходимо отметить, что из-за высокой размерности матрицы каскадного канала его оценка занимает много

времени [4]. Однако, существуют методы понижения сложности процедуры оценки [10].

Альтернативным подходом является оценка сепаратного канала, для которого требуется наличие сенсорных элементов на RIS (полупассивный RIS). Такой подход позволяет раздельно оценивать каналы TX-RIS и RIS-RX [11–13]. Хотя применение сенсорных элементов значительно снижает время процедуры оценки канала, оно противоречит основной идее RIS, так как эти элементы повышают энергопотребление и стоимость производства. Однако в [14] предложен метод оценки сепаратного канала при помощи полностью пассивного RIS, что требует наличие полнодуплексной передачи на TX и дополнительных этапов процедуры оценки канала.

Хоть в литературе предложено множество алгоритмов настройки, остается непонятным какой из них выбрать. Часто оказывается необходимым найти компромисс между временем, требуемым на оценку канала, и точностью этой самой оценки. Данный выбор встречается, например, в [14], где алгоритм оценки сепаратного канала, использующий полностью пассивный RIS, оказывается быстрее алгоритма, оценивающего каскадный канал [9]. Однако второй дает более точную оценку. Поиск оптимального для поставленной задачи алгоритма может быть осуществлен, если будет понятно, как сильно ошибка оценки CSI сказывается на эффективности системы, например, пропускной способности. Чтобы определить это, необходимо производить настройку RIS на основе CSI.

Корректно настроенный RIS позволяет производить формирование луча, которое и обеспечивает высокую производительность сети благодаря более сильному сигналу на стороне приемника. В существующих работах разработано множество алгоритмов как для систем MISO [15, 16], так и для систем MIMO [17–21]. Однако все предложенные алгоритмы требуют информацию о раздельных каналах TX-RIS и RIS-RX. В то время, как алгоритмы для систем MISO легко могут быть модифицированы под использование каскадного канала, адаптация алгоритмов в случае систем MIMO является нетривиальной задачей. Отсутствие алгоритмов настройки RIS в системах MIMO делает невозможным определение влияния ошибок CSI на работу сети, а значит нет возможности выбрать оптимальный алгоритм оценки канала.

Данная работа посвящена исследованию влияния ошибок оценки канала на пропускную способность систем MIMO. Для этого проведена адаптация существующего алгоритма, производящего настройку RIS на основе сепаратного канала канала, под использование каскадного канала. Адаптированный алгоритм позволяет вычислить пропускную способность сети и определить как на ней сказываются ошибки CSI.

Дальнейшее изложение работы устроено следующим образом. Раздел 2 подробно описывает существующие работы, посвященные оценке канала и настройке RIS. В разделе 3 подробно описана модель системы с RIS и дано определение каскадного канала. В раздел 4 произведена адаптация алгоритма настройки отражающих коэффициентов RIS и ковариационной матрицы передаваемого сигнала путем максимизации взаимной информации.

Раздел 5 описывает модель ошибок в случае неидеального CSI. В разделе 6 приведен сценарий для моделирования, и показано влияние ошибок CSI на пропускную способность. Раздел 7 завершает работу.

Обозначения и свойства: Матрицы обозначены жирными заглавными буквами ($\mathbf{A}, \mathbf{B}, \dots$), элементы матриц обозначены как $(A_{i,j}, B_{i,j}, \dots)$. Векторы обозначены жирными строчными буквами ($\mathbf{a}, \mathbf{b}, \dots$), элементы векторов обозначены как (a_i, b_i, \dots) . $|z|$, $\arg\{\dots\}$ и z^* обозначают абсолютное значение, аргумент и сопряжение комплексного числа, соответственно. Для любой матрицы \mathbf{A} : \mathbf{A}^T и \mathbf{A}^H являются транспонированием и эрмитовым сопряжением, соответственно. Для квадратных матриц \mathbf{S} : $\det(\mathbf{S})$, $\text{tr}(\mathbf{S})$ и \mathbf{S}^{-1} являются определителем, следом и обратной матрицей, соответственно. Оператор $\text{diag}(\mathbf{A})$ (для матриц) обозначает векторное представление главной диагонали, в то же время $\text{diag}(\mathbf{a})$ (для векторов) обозначает квадратную диагональную матрицу с элементами \mathbf{a} на главной диагонали. Операторы \odot , \otimes и \diamond обозначают произведения Адамара, Кронекера и Хатри-Рао, соответственно. \mathbf{I}_N является единичной матрицей размера $N \times N$. Оператор $\text{vec}(\cdot)$ обозначает векторизацию матрицы $M \times N$, а $\text{vec}_{M \times N}^{-1}(\cdot)$ обозначает обратную операцию. $\mathbb{E}[\cdot]$ обозначает математическое ожидание. В данной работе используются следующие равенства [22]:

$$(\mathbf{A} \otimes \mathbf{B})(\mathbf{C} \otimes \mathbf{D}) = (\mathbf{AC}) \otimes (\mathbf{BD}), \quad (1)$$

$$(\mathbf{A} \otimes \mathbf{B})(\mathbf{C} \diamond \mathbf{D}) = (\mathbf{AC}) \diamond (\mathbf{BD}), \quad (2)$$

$$\text{vec}_{M \times N}^{-1}(\mathbf{a}) = ((\text{vec}(\mathbf{I}_N))^T \otimes \mathbf{I}_M)(\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{a}), \quad (3)$$

$$\text{vec}(\mathbf{ABC}) = (\mathbf{C}^T \otimes \mathbf{A})\text{vec}(\mathbf{B}). \quad (4)$$

Если \mathbf{B} является диагональной матрицей, то:

$$\text{vec}(\mathbf{ABC}) = (\mathbf{C}^T \diamond \mathbf{A})\text{diag}(\mathbf{B}), \quad (5)$$

2 Обзор литературы

В рамках исследования оценки каскадного канала было предложено множество различных алгоритмов, позволяющих ускорить процедуру оценки. В исследовании [23] авторы разработали алгоритм основанный на методе обработки сжимаемых данных (англ.: Compressive Sensing, CS), который позволяет работать с сильно разреженными матрицами. Такая необходимость появляется, например, в системах mmWave MIMO, где канал нередко оказывается разреженным в связи с затуханием сигнала на высоких частотах, на которых работает mmWave [6]. Данный подход позволяет сократить число необходимых пилотных сигналов для оценки канала, однако алгоритмы CS

требуют больших вычислительных ресурсов, что может значительно повысить стоимость оборудования.

В статье [10] авторы предлагают метод, значительно уменьшающий время оценки каскадного канала. Суть метода заключается в оценке канала для одного пользователя и использовании его в качестве опорного для понижения количества пилотных сигналов, необходимых для оценки каналов других пользователей. Недостатком данного метода является неэффективность в сценариях, когда пользователи находятся далеко друг от друга, поскольку в таком случае нельзя выделить какое-то устройство RX как опорное.

В литературе уделяется мало внимания оценке сепаратного канала с помощью полностью пассивного RIS, однако некоторые работы все же предлагают эффективные методы. Для получения сепаратного канала применяется техника матричного разложения. В работах [7, 8] авторы применяют его для разложения оцененного каскадного канала на сепаратные каналы TX-RIS и RIS-RX. Однако легко показать, что такое разложение не единственно [14]. Этот факт, наряду с немалой вычислительной сложностью, ограничивает возможность применения данного подхода для решения задач по оценке канала в системах с RIS.

Описанные выше ограничения получения сепаратного канала с помощью полностью пассивного RIS отсутствуют в [14], где предлагается отдельно оценивать канал TX-RIS с помощью пилотных сигналов, которые будут отражены RIS обратно на TX. В статье также демонстрируется, что, при использовании уже известного канала TX-RIS, процедура оценки канала RIS-RX значительно облегчается. Считая канал TX-RIS статическим, авторы предлагают реже проводить процедуру его оценки, что и позволяет получить выигрыш в скорости. Результаты демонстрируют значительное уменьшение необходимых пилотных сигналов по сравнению с оценкой каскадного канала из [9].

В этой же работе авторы проводят сравнение ошибок CSI при оценке каскадного и сепаратного каналов. Для оценки сепаратного канала сперва производится оценка TX-RIS и RIS-RIX с помощью предложенного в работе метода. Затем на основе TX-RIS и RIS-RIX строится матрица каскадного канала TX-RIS-RX^s. Для оценки каскадного канала сразу производится оценка матрицы канала TX-RIS-RX^c на основе метода из [9]. Для сравнения двух подходов в качестве метрики используется среднеквадратичное отклонение (NMSE) оцененных TX-RIS-RX^s и TX-RIS-RX^c от идеальной матрицы каскадного канала. Результаты моделирования показывают, что NMSE для TX-RIS-RX^c на 20 дБ меньше, чем NMSE для TX-RIS-RX^s. Это означает, что оценка каскадного канала дает более точные результаты. В результате необходимо искать баланс между скоростью оценки и ее точностью.

Использование рассмотренных методов позволяет получить оценку CSI, которая необходима для настройки активного и пассивного формирования луча на TX и RIS, соответственно. Пассивное формирование луча достигается путем настройки отражающих элементов RIS, а активное с помощью распределения энергии на антеннах передатчика. Задача настройки RIS, на-

равне с задачей оценки канала, активно изучается. Существующие работы предлагают алгоритмы для множества различных сценариев.

В статье [15] авторы разработали алгоритм настройки RIS в многопользовательских системах MU-MISO, рассматривая в качестве целевой функции отношение сигнал/интерференция-шум (англ.: Signal to Interference-Noise Ratio, SINR). Использование SINR обусловлено тем, что одновременная передача сигнала нескольким пользователям создает интерференцию, которая сильно влияет на качество приема. Задача оптимизации заключается в максимизации минимального среди всех пользователей SINR. В качестве входных параметров используется CSI между каждым пользователем, каждым элементом RIS и TX, а также прямой канал между каждым пользователем и TX. Аналогичный сценарий рассматривается в [16], однако целевой функцией выступает суммарная пропускная способность всех пользователей, а входными параметрами являются отдельные каналы.

Большинство работ, посвященных настройке RIS, рассматривают MISO сценарий, где у приемника имеется лишь одна антенна. На сегодняшний день все больше устройств оснащаются несколькими антеннами, что требует акцентировать внимание на системах MIMO. Настройка RIS в случае MIMO рассмотрена в работе [17], где оптимизируется взаимная информация между принятым и переданным сигналами. Алгоритм настраивает не только массив отражающих элементов, но и пространственную ориентацию RIS по отношению к TX и RX. Практическая полезность данной работы стоит под вопросом, так как на текущий момент не подразумевается, что RIS обладает механизмами, способными изменять его расположение. В качестве входных параметров алгоритм использует отдельные каналы TX-RIS и RIS-RX.

Альтернативный подход к настройке RIS в системах MIMO изучается в статье [18], где дополнительно к настройке RIS вместо пространственной ориентации настраивается активное формирование луча на передающей стороне. Алгоритм использует метод последовательной оптимизации, заключающийся в последовательной оптимизации матрицы ковариации передаваемого сигнала и каждого отражающего элемента на основе информации о отдельном канале. Авторы показывают, что данный алгоритм дает локально оптимальное решение в рамках оптимизации пропускной способности системы.

Недостатком существующих работ, посвященных настройке RIS в системах MIMO, является их неприменимость в случае, когда известна оценка каскадного канала, но не отдельного. Это приводит к тому, что уже описанная проблема поиска оптимального по времени и точности метода оценки канала не решается, так как нет возможности определить как сильно ошибка каскадного канала влияет на производительность системы.

3 Описание системы

Рассматривается система MIMO с одним передатчиком TX, оснащенным N_t антеннами, одним приемником RX с N_r антеннами и одной RIS, обладающей

M отражающими элементами, как показано на рис. 1. Введем следующие обозначения: $\mathbf{T} \in \mathbb{C}^{M \times N_t}$ — матрица канала TX-RIS, $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{N_r \times M}$ — матрица канала RIS-RX, $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ — матрицы канала прямой видимости между TX и RX. Также за $\Theta \in \mathbb{C}^{M \times M}$ обозначим диагональную матрицу отражающих коэффициентов, $\Theta = \text{diag}\{\alpha_1, \dots, \alpha_M\}$, причем в рассматриваемой модели RIS имеет возможность изменять фазу падающего сигнала, но не его амплитуду, поэтому $\alpha_m = e^{j\phi_m}$, где ϕ_m — действительная величина, определяющая фазовый сдвиг, на соответствующем элементе RIS. Таким образом, матрица канала всей системы определяется как $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{R}\Theta\mathbf{T} + \mathbf{H}$, $\tilde{\mathbf{H}} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$.

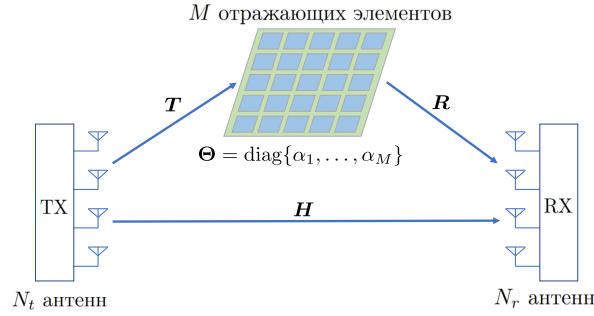


Рис. 1: Схема системы MIMO с RIS.

Пусть $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ — вектор сигнала на передатчике, где каждый элемент соответствует одной антенне. Тогда принятый сигнал определяется как

$$\mathbf{y} = \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{x} + \mathbf{n} = (\mathbf{R}\Theta\mathbf{T} + \mathbf{H})\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (6)$$

где $\mathbf{n} \in \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_r})$ — гауссовский шум с нулевым средним и стандартным отклонением σ_n . Средняя мощность такого шума равна σ_n^2 .

Учитывая (5), принятый сигнал можно записать как:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \text{vec}(\mathbf{I}_{N_r} \mathbf{R}\Theta\mathbf{T}\mathbf{x}) + \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \\ &= (\mathbf{x}^T \otimes \mathbf{I}_{N_r}) \text{vec}(\mathbf{R}\Theta\mathbf{T}) + \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \\ &= (\mathbf{x}^T \otimes \mathbf{I}_{N_r})(\mathbf{T}^T \diamond \mathbf{R}) \text{diag}(\Theta) + \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}. \end{aligned} \quad (7)$$

Определим каскадный канал следующим образом:

$$\mathbf{H}_{casc} \triangleq \mathbf{T}^T \diamond \mathbf{R}. \quad (8)$$

Рассмотрим структуру каскадного канала более подробно: $\mathbf{H}_{casc} = \mathbf{T}^T \diamond \mathbf{R} = [\mathbf{t}_1^T \otimes \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{t}_M^T \otimes \mathbf{r}_M]$, где $\mathbf{t}_m^T \otimes \mathbf{r}_m$ имеет следующий вид:

$$\mathbf{t}_m^T \otimes \mathbf{r}_m = \left[\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} T_{m,1}R_{1,m} \\ T_{m,1}R_{2,m} \\ \vdots \\ T_{m,1}R_{N_r,m} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} T_{m,2}R_{1,m} \\ T_{m,2}R_{2,m} \\ \vdots \\ T_{m,2}R_{N_r,m} \end{array} \right] \dots \left[\begin{array}{c} T_{m,N_t}R_{1,m} \\ T_{m,N_t}R_{2,m} \\ \vdots \\ T_{m,N_t}R_{N_r,m} \end{array} \right] \end{array} \right]^T. \quad (9)$$

Таким образом, из \mathbf{H}_{casc} возможно получить все парные произведения вида $\{T_{m,i}R_{j,m} \mid m = 1, \dots, M; \quad i = 1, \dots, N_t; \quad j = 1, \dots, N_r\}$.

4 Адаптация алгоритма настройки RIS

Рассмотрим алгоритм из [18], который основан на максимизации пропускной способности системы C . Матрицу ковариации сигнала передатчика \mathbf{x} обозначим за $\mathbf{Q} = \mathbb{E}[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$. Мощность передачи ограничена значением P , т.е. $\text{tr}(\mathbf{Q}) \leq P$. Тогда задача оптимизации пропускной способности ставится следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{(P1)} \quad C &= \max_{\Theta, \mathbf{Q}} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{1}{\sigma_n^2} \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{H}}^H \right) \\ \text{s.t.} \quad \Theta &= \text{diag}\{\alpha_1, \dots, \alpha_M\} \\ |\alpha_m| &= 1, \quad m = 1, \dots, M \\ \text{tr}(\mathbf{Q}) &\leq P. \end{aligned} \quad (10)$$

Алгоритм настройки RIS работает по принципу последовательной оптимизации. Сперва происходит оптимизация матрицы ковариации \mathbf{Q} при заданных $\{\alpha_m\}_{m=1}^M$, а затем оптимизируются отражающие коэффициенты α_m при заданных $\{\alpha_i \mid i \neq m\}_{i=1}^M$ и \mathbf{Q} . Рассматриваемый алгоритм является локально оптимальным для задачи максимизации взаимной информации.

Оптимизация α_m при заданных $\{\alpha_i \mid i \neq m\}_{i=1}^M$ и \mathbf{Q} : Сперва введем следующие обозначения: $\mathbf{r}_m \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ — m -ый столбец матрицы \mathbf{R} , а $\mathbf{t}_m \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ — m -ая строка матрицы \mathbf{T} . Также с помощью сингулярного разложения представим матрицу ковариации как $\mathbf{Q} = \mathbf{U}_Q \boldsymbol{\Sigma}_Q \mathbf{U}_Q^H$. Дополнительно определим $\mathbf{H}' = \mathbf{H} \mathbf{U}_Q \boldsymbol{\Sigma}_Q^{\frac{1}{2}}$ и $\mathbf{t}'_m = \mathbf{t}_m \mathbf{U}_Q \boldsymbol{\Sigma}_Q^{\frac{1}{2}}$. Для нахождения оптимального α_m , целевая функция в (P1) приводится к виду [18]:

$$f_m \triangleq \log_2 \det \left(\mathbf{A}_m + \alpha_m \mathbf{B}_m + \alpha_m^* \mathbf{B}_m^H \right) = f, \quad (11)$$

где:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_m &= \mathbf{I}_{N_r} + \frac{1}{\sigma_n^2} \left(\mathbf{H}' + \sum_{i=1, i \neq m}^M \alpha_i \mathbf{r}_i \mathbf{t}'_i \right) \\ &\times \left(\mathbf{H}' + \sum_{i=1, i \neq m}^M \alpha_i \mathbf{r}_i \mathbf{t}'_i \right)^H + \frac{1}{\sigma_n^2} \mathbf{r}_m \mathbf{t}'_m \mathbf{t}'_m{}^H \mathbf{r}_m{}^H \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{B}_m = \frac{1}{\sigma_n^2} \mathbf{r}_m \mathbf{t}'_m \left(\mathbf{H}'^H + \sum_{i=1, i \neq m}^M \mathbf{t}'_i{}^H \mathbf{r}_i{}^H \alpha_i^* \right) \quad (13)$$

Тогда оптимальное решение α_m^* представляется в виде:

$$\alpha_m = \begin{cases} e^{-j \arg\{\lambda_m\}} & \text{если } \text{tr}(\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m) \neq 0 \\ 1 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (14)$$

где λ_m — единственное собственное значение $\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m$.

В текущем представлении матрицы \mathbf{A}_m и \mathbf{B}_m зависят от \mathbf{r}_m и \mathbf{t}_m , то есть необходимо обладать матрицами каналов \mathbf{R} и \mathbf{T} для их вычисления. Однако, можно заметить, что \mathbf{r}_m и \mathbf{t}_m входят в выражения лишь в виде парных произведений: $\mathbf{r}_m \mathbf{t}'_m = \mathbf{r}_m \mathbf{t}_m \mathbf{U}_Q \boldsymbol{\Sigma}_Q^{\frac{1}{2}}$ и $\mathbf{t}'_m \mathbf{r}_m{}^H = \boldsymbol{\Sigma}_Q^{\frac{1}{2}} \mathbf{U}_Q^H (\mathbf{r}_m \mathbf{t}_m)^H$. Очевидно, что $\mathbf{r}_m \mathbf{t}_m$ состоят из произведения соответствующих элементов матриц \mathbf{R} и \mathbf{T} : $\{R_{j,m} T_{m,i} \mid i = 1, \dots, N_t; j = 1, \dots, N_r\}$. Учитывая структуру каскадного канала (8), несложно показать:

$$\mathbf{r}_m \mathbf{t}_m = \text{vec}_{N_r \times N_t}^{-1} (\mathbf{t}_m^T \otimes \mathbf{r}_m) = \text{vec}_{N_r \times N_t}^{-1} (\mathbf{h}_m), \quad (15)$$

где \mathbf{h}_m — m -ый столбец матрицы \mathbf{H}_{casc} . Таким образом, для вычисления \mathbf{A}_m и \mathbf{B}_m , а значит и для α_m^* , достаточно информации о каскадном канале \mathbf{H}_{casc} .

Оптимизация \mathbf{Q} при заданных $\{\alpha_m\}_{m=1}^M$: Для оптимизации ковариационной матрицы \mathbf{Q} при заданных отражающих коэффициентах $\{\alpha_m\}_{m=1}^M$ используется метод «заполнения водой» (англ.: water filling) [24]. Для реализации данного метода необходимо разложить матрицу канала всей системы $\tilde{\mathbf{H}}$ с помощью сингулярного разложение. Покажем, как $\tilde{\mathbf{H}}$ выражается через \mathbf{H}_{casc} , используя (3) и (5):

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{H}} &= \mathbf{R} \boldsymbol{\Theta} \mathbf{T} + \mathbf{H} = \text{vec}_{N_r \times N_t}^{-1} \text{vec}(\mathbf{R} \boldsymbol{\Theta} \mathbf{T}) + \mathbf{H} \\ &= \text{vec}_{N_r \times N_t}^{-1} ((\mathbf{T}^T \diamond \mathbf{R}) \text{diag}(\boldsymbol{\Theta})) + \mathbf{H} \\ &= ((\text{vec}(\mathbf{I}_{N_t}))^T \otimes \mathbf{I}_{N_r}) (\mathbf{I}_{N_t} \otimes (\mathbf{T}^T \diamond \mathbf{R}) \text{diag}(\boldsymbol{\Theta})) + \mathbf{H} \\ &= ((\text{vec}(\mathbf{I}_{N_t}))^T \otimes \mathbf{I}_{N_r}) (\mathbf{I}_{N_t} \otimes \mathbf{H}_{casc} \text{diag}(\boldsymbol{\Theta})) + \mathbf{H}. \end{aligned} \quad (16)$$

Показано, что в алгоритме из работы [18] все вычисления, требующие матрицы каналов \mathbf{R} и \mathbf{T} , могут быть модифицированы так, чтобы использовать лишь \mathbf{H}_{casc} . Таким образом, получена модификация алгоритма, позволяющая производить настройку RIS на основе информации о каскадного канала.

5 Неидеальный CSI

В разделе 2 рассматривалась работа [14], где проводится сравнение ошибок CSI при оценке каскадного и сепаратного каналов. Для оценки сепаратного канала сперва производится оценка \mathbf{R} и \mathbf{T} с помощью предложенного в работе метода. Затем на основе \mathbf{R} и \mathbf{T} строится матрица каскадного канала $\mathbf{H}_{casc}^s = \mathbf{T}^T \diamond \mathbf{R}$ (индекс s означает, что матрица каскадного канала получена из матриц сепаратного канала). Для оценки каскадного канала сразу производится оценка матрицы \mathbf{H}_{casc}^c на основе метода из [9] (индекс c означает, что матрица каскадного канала получена напрямую из оценки каскадного канала).

В связи с тем, что в [14] представлены NMSE только для каскадного представления, в данной работе ошибки вычисляются также только для \mathbf{H}_{casc}^c и \mathbf{H}_{casc}^s , но не для \mathbf{R} и \mathbf{T} . Поэтому, для анализа влияния ошибки при оценках каскадного и сепаратного канала, используется модифицированный алгоритм, принимающий на \mathbf{H}_{casc}^c и \mathbf{H}_{casc}^s .

Как в работах [25, 26] ошибка CSI имеет гауссово распределение:

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{casc} = \hat{\mathbf{H}}_{casc} + \Delta \mathbf{H}_{casc}, \\ \mathbf{H} = \hat{\mathbf{H}} + \Delta \mathbf{H}, \end{cases} \quad (17)$$

где $\hat{\mathbf{H}}$ и $\hat{\mathbf{H}}_{casc}$ являются оценками каналов, а $\Delta \mathbf{H}$ и $\Delta \mathbf{H}_{casc}$ обозначают ошибки, имеющие гауссово распределение, с нулевым средним и стандартными отклонениями σ_H и σ_{casc} , соответственно.

Чтобы оценить влияние ошибок проводится следующая процедура. Сначала с помощью модифицированного алгоритма настройки из предыдущего раздела вычисляются матрицы $\hat{\mathbf{Q}}^*$ и $\hat{\Theta}^*$ при неидеальных $\hat{\mathbf{H}}_{casc}^c$ и $\hat{\mathbf{H}}$ (18). Затем вычисляется пропускная способность $C(\hat{\mathbf{Q}}^*, \hat{\Theta}^*)$, уже при использовании идеальных каналов \mathbf{H}_{casc} и \mathbf{H} (19). Полученные значения пропускных способностей сравниваются с $C(\mathbf{Q}^*, \Theta^*)$, где \mathbf{Q}^* и Θ^* — матрицы в случае идеальной идеального каскадного канала \mathbf{H}_{casc} .

$$\max_{\Theta, \mathbf{Q}} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{1}{\sigma_n^2} \hat{\mathbf{H}} \mathbf{Q} \hat{\mathbf{H}}^H \right) \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \hat{\mathbf{H}} = \text{vec}_{N_r \times N_t}^{-1}(\hat{\mathbf{H}}_{casc}^{c/s} \text{diag}(\Theta)) + \hat{\mathbf{H}}$$

$$\downarrow \hat{\Theta}^*, \hat{\mathbf{Q}}^*$$

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{1}{\sigma_n^2} \tilde{\mathbf{H}} \hat{\mathbf{Q}}^* \tilde{\mathbf{H}}^H \right) \quad (19)$$

$$\text{s.t. } \tilde{\mathbf{H}} = \text{vec}_{N_r \times N_t}^{-1}(\mathbf{H}_{casc} \text{diag}(\hat{\Theta}^*)) + \mathbf{H},$$

где верхний индекс c/s означает использование одной из оцененных матриц каскадного канала.

6 Численные результаты

Для проведения измерений рассматривается сценарий на рис. 1. Матрицы каналов рассчитаны с помощью платформы моделирования [27], основанной на платформе QuaDRiGa [28]. TX и RX расположены в точках $(0, 0, 2)$ и $(40, 0, 2)$, а RIS в $(40, 5, 3)$, где координаты указаны в метрах. Остальные параметры сценария для моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры моделирования.

Параметр	Значение
Сценарий	3GPP 38.901 UMi NLoS
Частота, ГГц	5.3
P , дБм	0...30
σ_n^2 , дБм	-100
N_r	4
N_t	16
M	256

Изучим влияние ошибок оценок каналов на настройку RIS, а именно, вычислим пропускные способности обоих методов оценки канала при переменной мощности передатчика P для 80 различных реализаций канала. Величины σ_H и σ_{casc} вычисляются на основе NMSE. В данной работе $\text{NMSE}(\mathbf{H}_{casc}^c) = -10$ дБ, а $\text{NMSE}(\mathbf{H}_{casc}^s) = -30$ дБ. Результаты моделирования представлены на рис. 2. Из графика видно, что при заданных NMSE пропускная способность системы в случае оценки сепаратного канала оказывается до 25% ниже, чем в случае оценки каскадного канала.

7 Заключение

В данной работе изучено влияние ошибок CSI, полученных при разных методах оценки канала, на пропускную способность системы MIMO. Для этого был модифицирован алгоритм настройки RIS, требующий информации о сепаратном канале, под использование каскадного канала. Алгоритм был реализован в платформе имитационного моделирования, где на его основе получена пропускная способность системы. Результаты показали, что из-за ошибок оценка сепаратного канала снижает пропускную способность системы до 25% по сравнению с оценкой каскадного канала. Это показывает, что хоть процедура оценки сепаратного канала имеет меньшую длительность, она может быть менее эффективной в некоторых сценариях, так как дает большие ошибки по сравнению с оценкой каскадного канала. Полученные результаты позволят понять, как ошибка оценки канала влияет на производительность системы, что, в свою очередь, поможет подобрать более подходящие алгоритмы оценки каналов для различных сценариев.

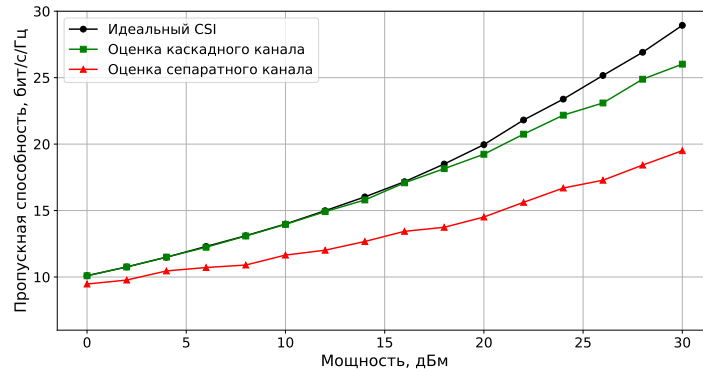


Рис. 2: Зависимость пропускной способности от частоты для различных ошибок CSI.

Список литературы

1. M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, "6g wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957–975, 2020.
2. H. Yang, F. Yang, S. Xu, Y. Mao, M. Li, X. Cao, and J. Gao, "A 1-bit 10×10 reconfigurable reflectarray antenna: design, optimization, and experiment," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 6, pp. 2246–2254, 2016.
3. F. Venneri, S. Costanzo, and G. Di Massa, "Design and validation of a reconfigurable single varactor-tuned reflectarray," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 2, pp. 635–645, 2012.
4. B. Zheng, C. You, W. Mei, and R. Zhang, "A survey on channel estimation and practical passive beamforming design for intelligent reflecting surface aided wireless communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 1035–1071, 2022.
5. B. Zheng and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface-enhanced ofdm: Channel estimation and reflection optimization," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 4, pp. 518–522, 2019.
6. C. Jia, J. Cheng, H. Gao, and W. Xu, "High-resolution channel estimation for intelligent reflecting surface-assisted mmwave communications," in *2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1–6, IEEE, 2020.
7. G. T. de Araújo, A. L. De Almeida, and R. Boyer, "Channel estimation for intelligent reflecting surface assisted mimo systems: A tensor modeling approach," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 15, no. 3, pp. 789–802, 2021.
8. Z.-Q. He and X. Yuan, "Cascaded channel estimation for large intelligent metasurface assisted massive mimo," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 210–214, 2019.

9. T. L. Jensen and E. De Carvalho, "An optimal channel estimation scheme for intelligent reflecting surfaces based on a minimum variance unbiased estimator," in *ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 5000–5004, IEEE, 2020.
10. Z. Wang, L. Liu, and S. Cui, "Channel estimation for intelligent reflecting surface assisted multiuser communications: Framework, algorithms, and analysis," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 10, pp. 6607–6620, 2020.
11. X. Chen, J. Shi, Z. Yang, and L. Wu, "Low-complexity channel estimation for intelligent reflecting surface-enhanced massive mimo," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 5, pp. 996–1000, 2021.
12. Y. Lin, S. Jin, M. Matthaiou, and X. You, "Tensor-based algebraic channel estimation for hybrid irs-assisted mimo-ofdm," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 3770–3784, 2021.
13. A. Taha, M. Alrabeiah, and A. Alkhateeb, "Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning," *IEEE access*, vol. 9, pp. 44304–44321, 2021.
14. C. Hu, L. Dai, S. Han, and X. Wang, "Two-timescale channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 11, pp. 7736–7747, 2021.
15. H. Alwazani, A. Kammoun, A. Chaaban, M. Debbah, M.-S. Alouini, *et al.*, "Intelligent reflecting surface-assisted multi-user miso communication: Channel estimation and beamforming design," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 661–680, 2020.
16. H. Guo, Y.-C. Liang, J. Chen, and E. G. Larsson, "Weighted sum-rate maximization for reconfigurable intelligent surface aided wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 5, pp. 3064–3076, 2020.
17. M. Zhang and X. Yuan, "Intelligent reflecting surface aided mimo with cascaded line-of-sight links: Channel modelling and capacity analysis," *arXiv preprint arXiv:2109.08913*, 2021.
18. S. Zhang and R. Zhang, "Capacity characterization for intelligent reflecting surface aided mimo communication," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 8, pp. 1823–1838, 2020.
19. C. Feng, W. Shen, X. Gao, and J. An, "Passive beamforming design for intelligent reflecting surface assisted mimo systems," *China Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 18–28, 2021.
20. J. Li and Y. Hong, "Design of an intelligent reflecting surface aided mmwave massive mimo using x-precoding," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 69428–69440, 2022.
21. X. Ma, Z. Chen, L. Yan, C. Han, and Q. Wen, "Joint hardware design and capacity analysis for intelligent reflecting surface enabled terahertz mimo communications," *arXiv preprint arXiv:2012.06993*, 2020.
22. S. Liu and O. TRENKLER, "Hadamard, khatri-rao, kronecker and other matrix products," *International Journal of Information & Systems Sciences*, vol. 4, 2008.
23. J. He, M. Leinonen, H. Wymeersch, and M. Juntti, "Channel estimation for ris-aided mmwave mimo channels," *arXiv preprint arXiv:2002.06453*, 2020.
24. E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj, and H. V. Poor, *MIMO wireless communications*. Cambridge university press, 2007.
25. S. Hong, C. Pan, H. Ren, K. Wang, K. K. Chai, and A. Nallanathan, "Robust transmission design for intelligent reflecting surface-aided secure communication systems with imperfect cascaded csi," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 4, pp. 2487–2501, 2020.

26. G. Zheng, S. Ma, K.-K. Wong, and T.-S. Ng, "Robust beamforming in cognitive radio," *IEEE Transactions on wireless communications*, vol. 9, no. 2, pp. 570–576, 2010.
27. Буртаков-И.А.-Куреев-А.А.-Ендовицкий-Е.О., "Моделирование беспроводных сетей с реконфигурируемой интеллектуальной поверхностью," in *Сборник трудов 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ*, pp. 91–92, 2021.
28. S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Börner, and L. Thiele, "Quadriga: A 3-d multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 62, no. 6, pp. 3242–3256, 2014.

Оценка распределения задержки при использовании периодического окна ограниченного доступа в случае коротких слотов

Е.А. Зажигина^{1,2}, Р.Р. Юсупов^{1,2}

{zazhigina, yusupov}@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Аннотация С развитием Интернета вещей возникает задача обеспечения связью большого количества станций, одновременно подключенных к сети. Увеличение числа одновременно подключенных станций ведет к возрастанию конкуренции за доступ к каналу и замедлению скорости передачи данных. В стандарте IEEE 802.11ah введен механизм окна ограниченного доступа, позволяющий снизить конкуренцию за доступ к каналу посредством резервирования интервала времени для передач определенной группы станций. Для того, чтобы обеспечить надежную и быструю доставку данных от станций и выделить под окно ограниченного доступа наименьшее количество канального времени для передачи остальными станциями, необходимо оптимально выбирать параметры окна ограниченного доступа. В данной статье строится аналитическая модель передачи разреженного трафика с использованием периодического окна ограниченного доступа для коротких слотов в сценарии быстрой и надежной доставки, позволяющая в явном виде найти вероятность доставки кадров за заданное время. Полученная модель обладает малой вычислительной сложностью по сравнению с другими аналитическими моделями и высокой точностью, что делает ее применимой для оптимизации параметров RAW в сценарии быстрой и надежной доставки.

Ключевые слова: IEEE 802.11ah, Wi-Fi HaLow, окно ограниченного доступа, математическое моделирование.

1 Введение

Интернет вещей все более плотно входит в повседневную жизнь: развиваются умные города, умное производство и другие отрасли. Популярная беспроводная технология Wi-Fi была адаптирована для сценариев Интернета

вещей в стандарте IEEE 802.11ah, где поддерживается до 8 тысяч одновременно подключенных станций. Большое число одновременно подключенных станций конкурируют за доступ к каналу, что представляет проблему для сетей Wi-Fi. Результатом конкуренции являются коллизии кадров и большая задержка кадров в системе.

В стандарте IEEE 802.11ah вводится механизм окна ограниченного доступа (англ.: Restricted Access Window, RAW), который способен решить проблему высокой конкуренции за доступ к каналу в сетях Интернета вещей. Информация об интервале RAW рассылается посредством бикон-кадров (англ.: beacon frame), и может быть разослана единожды для установки периодического RAW (англ.: Periodic Restricted Access Window, PRAW). Каждый интервал RAW делится на один или несколько RAW-слотов. Передача данных внутри RAW-слота происходит согласно базовому методу случайного доступа EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access).

Стандарт IEEE 802.11ah не дает рекомендаций насчет выбора параметров механизма RAW, таких как число RAW-слотов, длина периода, длина RAW-слота и др. Однако это необходимо делать под нужды каждого отдельного сценария. Один из способов выбора параметров основан на аналитическом моделировании.

Многие исследования оценивают производительность RAW по пропускной способности в режиме насыщения, однако типичным сценарием для Интернета вещей является разреженный трафик, где существенными становятся задержка данных и доля потерянных пакетов. Существуют модели [1–5], которые хорошо оценивают производительность RAW для случая разреженного трафика, однако эти модели требуют значительных вычислительных ресурсов для расчета многомерных марковских цепей. Для того, чтобы использовать модели в приложениях реального времени, необходима легковесная модель. Одним из способов снижения вычислительной сложности является рассмотрение коротких RAW-слотов, т.е. слотов, вмещающих только одну попытку передачи. Авторы [1, 2] рассматривают разреженный трафик и показывают на рис. 3 и рис. 3 соответственно, что короткие RAW-слоты, являются квазиоптимальными: с их помощью достигается минимальная или близкая к минимальной задержка.

В сценарии быстрой и надежной доставки данных — когда действует ограничение на вероятность доставки кадра за ограниченное время — возникает необходимость оценки выполнения ограничения на задержку кадров. Такой сценарий характерен, например, для датчиков температуры, которые измеряют температуру термостата. По достижении некоторого порога температуры необходимо оповестить центр управления о перегреве. Кадры данных должны быть доставлены как можно скорее и не должны быть утеряны. Потому целью данной работы является построение аналитической модели передачи разреженного трафика с использованием периодического окна ограниченного доступа для случая коротких слотов, позволяющей оценить вероятность доставки кадра за заданное время. Использование коротких RAW-слотов снижает вычислительную сложность модели, что позволя-

ет точке доступа оперативно использовать ее для рассылки новых параметров PRAW в меняющихся условиях. Полученная модель позволяет выразить в явном виде вероятность доставки кадра за заданное время, при этом требуя низкие вычислительные ресурсы, что делает возможным оперативно использовать ее для оптимизации параметров метода доступа RAW.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приводится описание механизмов, используемых в сетях Интернета вещей, и обзор существующих работ, аналитически исследующих RAW, с объяснением, почему описанные подходы не могут быть применены для решения обозначенной задачи. Далее в главах 3 и 4 приводится описание рассматриваемого сценария и построение аналитической модели соответственно. В главе 5 представлен анализ численных результатов, полученных с помощью построенной модели. Затем в главе 6 подводятся итоги работы.

2 Объект исследования и обзор литературы

2.1 Restricted Access Window

Механизм RAW представляет собой выделенный точкой доступа интервал времени для подмножества станций, в течение которого только это подмножество может передавать данные. Интервал RAW может быть разделен на несколько RAW-слотов. Из подмножества станций выделяют одну или несколько групп станций, каждая из которых передает в пределах своего RAW-слота (рис. 1). Параметры RAW устанавливаются с помощью рассылки бикон-кадров, в которых задаются такие параметры, как длительность RAW-слота, количество RAW-слотов, периодичность RAW и др. Если времени до конца RAW-слота не хватает на передачу, то станция ждет следующий интервал RAW и уже там пытается передавать данные. Использование механизма RAW снижает конкуренцию за каналный ресурс посредством ограничения числа станций, одновременно пытающихся получить доступ к каналу.

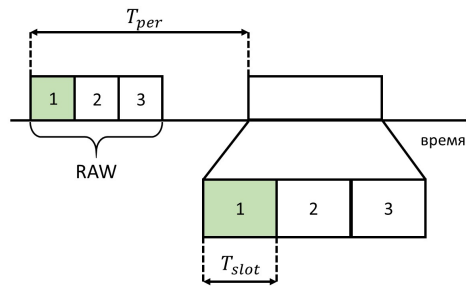


Рис. 1: Пример периодического интервала RAW с тремя RAW-слотами.

2.2 Метод случайного доступа

Внутри RAW-слотов передача кадров происходит согласно механизму EDCA, который основывается на механизме множественного доступа с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance, CSMA/CA) и механизме двоичной экспоненциальной отсрочки. Алгоритм доступа к каналу в которых работает следующим образом: в начале каждого RAW-слота каждая станция из выделенной группы инициализирует счетчик отсрочки целым числом, выбранным равновероятно из интервала $[0; W_0 - 1]$, где W_0 — минимальное конкурентное окно. Затем станции прослушивают канал в течение времени T_e и, если канал свободен, то уменьшают счетчик отсрочки на единицу. Если канал занят, то счетчики отсрочки замораживаются и отсчет возобновляется, когда канал освободится. Как только счетчик отсрочки сравняется с нулем, происходит попытка передачи кадра данных. Далее под словом «кадр» будет подразумеваться кадр данных. У каждого кадра есть счетчик, отвечающий за число неудачных попыток передач, максимальное допустимое значение которого R . По достижении R кадр отбрасывается. В случае коллизии, т.е. одновременной передачи нескольких станций, попавшая в нее станция удваивает конкурентное окно и выбирает новое значение счетчика отсрочки. Станция узнает, что ее кадр попал в коллизию, когда не получает кадр подтверждения от точки доступа. Когда начинается следующий RAW-слот этой же станции, то конкурентное окно возвращается к значению W_0 , в то время как счетчик повторных передач кадра остается тем же, пока кадр не будет отброшен или передан.

2.3 Обзор существующих работ

С момента своего появления в стандарте IEEE 802.11ah механизм RAW привлек внимание многих исследователей. Перед тем, как вышла финальная версия стандарта IEEE 802.11ah, многие аналитически исследовали механизм Group-Synchronized Distributed Coordination Function (GS-DCF), который является механизмом RAW, но с сохранением значения счетчика отсрочки и размера конкурентного окна между выделенными для одной и той же станции RAW-слотами [6, 7]. Во многих работах производительность механизма RAW оценивается по пропускной способности, задержке и энергопотреблению в предположении насыщенного трафика [6–9].

В сценариях Интернета вещей обычно рассматривают разреженный трафик. В работах [1–5, 10–12] учитывается сброс счетчика отсрочки в начале RAW и конечная длина RAW в сценарии разреженного трафика. Авторы [11, 12] анализируют работу EDCA, однако они полагают, что вероятность передачи не зависит от времени, что неприменимо в случае коротких RAW-слотов.

Для описания поведения сети в работах [1–5] рассматривается эволюция многомерных марковских цепей с дискретным временем, что требует

немалых вычислительных ресурсов и влечет за собой медленное реагирование на изменение внешних условий. Авторы [1] адаптируют модель из [4] для оценки пропускной способности, энергопотребления и доли отброшенных пакетов при ограничении на задержку в один период RAW. В работе [2] разработана модель для сценария быстрой и надежной доставки данных от любой из станций сети в случае разреженного трафика. Работы [1, 2] показали, что короткие RAW-слоты являются квазиоптимальными в терминах средней задержки для разреженного трафика. Модель из [10] позволяет в явном виде оценить среднюю мощность, потребляемую станцией, и среднюю задержку для случая коротких RAW-слотов.

Таким образом, существует множество работ, исследующих RAW в предположении насыщенного трафика. В то же время работы, которые рассматривают разреженный трафик, обладают высокой вычислительной сложностью из-за обьсчета многомерных марковских цепей или же не учитывают нюансов механизма RAW, прописанных в стандарте, таких как обновление счетчика отсрочки между интервалами RAW. В этом исследовании рассматривается разреженный трафик, PRAW и короткие RAW-слоты, в предположении которых строится легковесная аналитическая модель, основанная на модели из [10], учитывающая сброс счетчиков отсрочки и позволяющая оценить в явном виде вероятность доставки данных от каждой станции сети за ограниченное время.

3 Описание сценария и постановка задачи

Рассматривается гетерогенная сеть со станциями разных типов: сенсорам, требующими быстрой и надежной доставки данных при ненасыщенном трафике, и обычными станциями, которые передают насыщенный трафик. Из-за того, что обычные станции передают насыщенный трафик, сенсорам сложнее получить доступ к каналу для своих передач, что является причиной больших задержек кадров в системе и вовсе их утери [13].

N сенсоров осуществляют редкие замеры параметров окружающей среды и передают результаты замеров точке доступа. Все станции находятся в зоне уверенного приема друг друга. Влияние шума на передачи не рассматривается. Все кадры сенсоров имеют одинаковый размер и передаются с одинаковой сигнально-кодовой конструкцией. Из-за своей простоты, сенсоры могут иметь только один кадр в очереди. Моменты генерации кадров в пустую очередь подчиняются экспоненциальному распределению с интенсивностью λ . Для защиты сенсоров от конкуренции с обычными станциями точка доступа выделяет периодическое окно ограниченного доступа с M RAW-слотами, где каждому RAW-слоту соответствует какое-то подмножество сенсоров. Обычные станции передают вне интервала RAW, их производительность не рассматривается. Для передачи данных внутри RAW-слотов используется механизм EDCA. Для экономии энергии сенсорами механизм RAW можно использовать совместно с механизмом TWT (англ.: Target Wake Time, TWT), согласно которому точка доступа определяет расписание для

станций: когда они могут передавать данные и слушать канал, и когда они находятся в спящем состоянии. Если станции имеют кадр на передачу перед началом RAW-слота, то они «просыпаются» перед своим RAW-слотом и пытаются его передать. В конце своего RAW-слота станции засыпают. При условии разреженного потока трафика используются короткие RAW-слоты — RAW-слоты, длительности которых достаточно только для одной попытки передачи кадров. Если перед попыткой передачи выясняется, что длительности RAW-слота для ее окончания не хватает, то все станции из группы «засыпают» раньше номинального конца RAW-слота до следующего своего RAW-слота. Если кадр генерируется в течение RAW-слота, то станция будет передавать в следующем периоде, так как после начала любой передачи не хватит времени на передачу, и станции нет смысла включать радиointерфейс, если на момент начала RAW-слота очередь пуста.

Задержкой назовем время, которое прошло с момента генерации сенсором кадра до его успешной доставки. Под потреблением канального времени подразумевается отношение времени, занимаемого RAW, к длительности периода. В отличие от [10], рассматривается надежная доставка данных, т.е. обеспечение минимально допустимой доли кадров с задержкой менее заданной. Для того, чтобы эффективно использовать имеющиеся канальные ресурсы, необходимо минимизировать длину интервала RAW, чтобы давать время на передачу несенсорным станциям, при этом удовлетворяя ограничение на квантиль задержки сенсорных станций. Для оценки выполнения ограничений на квантиль задержки требуется построить аналитическую модель, способную по параметрам RAW найти вероятность, с которой выполняется ограничение на задержку.

4 Аналитическая модель

Для решения поставленной выше задачи разрабатывается аналитическая модель процессов передачи внутри RAW. При описании модели используется введенное в [14, 15] понятие виртуального слота — интервала времени между последовательными изменениями счетчика отсрочки. Успешным виртуальным слотом называется виртуальный слот, содержащий одну попытку передачи. Коллизионным виртуальным слотом называется виртуальный слот, содержащий более одной попытки передачи от разных станций. Пустым виртуальным слотом называется виртуальный слот, не содержащий никаких попыток передачи. Длительности успешного, коллизионного и пустого виртуальных слотов обозначаются как T_s , T_c и T_e соответственно. Полагаем, что передаются короткие кадры, при этом $T_s = T_c$. В отличие от реальных сетей, в аналитической модели кадры могут повторно передаваться бесконечное число раз, так как доля отброшенных пакетов по превышении R мала (см. рис. 4 из [10]).

В силу того, что рассматриваются короткие RAW-слоты, вмещающие не более одной попытки передачи, длительность RAW-слота может быть параметризована как $T_{slot} = T_s + K \cdot T_e$, где K — максимальное число пустых вир-

туальных слотов в RAW-слоте. Каждому RAW-слоту с номером m из всех M слотов выделяется группа из N_m сенсоров, где $m = 1 \dots M$, $\sum_{m=1}^M N_m = N$. Потребление канального ресурса CTC (англ.: channel time consumption), по определению, — это отношение $\frac{T_{slot} \cdot M}{T_{per}}$. Все RAW-слоты рассматриваются отдельно друг от друга по причине того, что передача на границах RAW-слотов запрещена. Поэтому разрабатывается модель для одного RAW-слота, которая затем расширяется для случая нескольких RAW-слотов.

Аналитическая модель представляет собой расширенную модель из [10]. В этом параграфе приведем выкладки, на основе которых будет развиваться новая модель. Для начала рассмотрим поведение группы сенсоров размером N_m в RAW-слоте m . Назовем станции, имеющие кадр на передачу, активными. Поведение группы сенсоров описывается с помощью цепи Маркова с дискретным временем и состоянием (n), где n — число активных станций на момент начала RAW-слота, а единицей времени является период RAW. Между двумя последовательными наблюдениями системы число активных станций либо уменьшается на единицу, либо остается таким же, либо увеличивается до N_m . Далее комбинаторными методами вычисляется вероятность успешной передачи, коллизии или отсутствия передачи в RAW-слоте. С помощью системы уравнений глобального баланса, зная, что почти вся нижняя половина матрицы переходных вероятностей содержит нули, находится стационарное распределение числа активных станций на момент начала RAW-слота $\mathbf{x}(N_m) = \{x_n(N_m)\}$, где $x_n(N_m)$, $n = 0 \dots N_m$, — вероятность наблюдать n активных станций в начале RAW-слота. Из стационарного распределения получается среднее число сгенерированных кадров v_m , равное среднему числу кадров, переданных за период RAW.

Далее рассматривается переходный процесс, который позволяет рассчитать вероятность доставки кадра произвольно выбранной станцией за ограничение на задержку в RAW-слоте с номером m . Необходимо знать распределение времени, прошедшего с момента генерации кадра до первого RAW-слота, где он может передаваться, и распределение числа периодов, в течение которых кадр передается. Задержка представляет собой сумму двух случайных величин, описываемых этими распределениями. Рассмотрим марковский процесс с дискретным временем, где единицей времени служит период RAW, а моментами наблюдения являются начала RAW-слотов выбранной станции. Состоянием (\bar{n}) цепи является или число активных станций, помимо выбранной, в начале RAW-слота, где $\bar{n} = 0 \dots N_m - 1$, или *a.s.* (англ.: absorbing state, поглощающее состояние), т.е. состояние, когда выбранная станция уже передала кадр.

Наблюдение за эволюцией начинается с первого RAW-слота, который следует за генерацией кадра на выбранной станции и в котором этот кадр может быть передан. Положим, что в момент поступления кадра в пустую очередь выбранной станции, установилось такое распределение числа активных станций, помимо выбранной, которое соответствует стационарному распределению числа активных станций в начале RAW-слота в системе из

$N - 1$ станции, т.е. $\mathbf{x}(N_m - 1)$. Это связано с тем, что до генерации кадра на выбранной станции группа сенсоров вела себя так, будто бы выбранной станции и не было в этой группе.

Функция распределения для интервала Δt от момента генерации кадра к моменту начала первого RAW-слота станции, в котором кадр может быть передан:

$$F_{\Delta t}(x) = P(\Delta t < x) = \frac{1 - e^{-\lambda x}}{1 - e^{-\lambda T_{per}}}, 0 \leq \Delta t \leq T_{per}.$$

Вероятность того, что задержка кадра D не превышает ограничение D_{lim} , при условии, что прошло i периодов RAW с момента генерации кадра:

$$P_{distr}(D \leq D_{lim}; i) = \begin{cases} 1, & \text{если } D_{lim} - T_{per} \cdot i - T_s \geq T_{per}, \\ 0, & \text{если } D_{lim} - T_{per} \cdot i - T_s < 0, \\ F_{\Delta t}(D_{lim} - T_{per} \cdot i - T_s), & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

С помощью матрицы переходных вероятностей, полученной аналогичным образом, как и для цепи Маркова из [10], рассматривается эволюция марковского процесса: кадр на выбранной станции может оставаться в очереди несколько периодов RAW, при этом распределение числа остальных активных станций меняется. Зная в каждом периоде распределение числа активных станций, помимо выбранной, и вероятность успешной передачи рассматриваемого кадра, можно получить вероятность успешной доставки кадра выбранной станцией за i периодов π_i . Тогда вероятность того, что задержка кадра меньше D_{lim} :

$$P_{slot}(D \leq D_{lim}; N_m) = \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{D_{lim}}{T_{per}} \rfloor} \pi_i \times P_{distr}(D \leq D_{lim}; i).$$

Теперь рассмотрим RAW целиком. Вероятность $F_D^{RAW}(D_{lim})$ того, что кадр передается быстрее, чем за время D_{lim} , определяется функцией распределения $P_{RAW}(D \leq D_{lim})$:

$$F_D^{RAW}(D_{lim}) = P_{RAW}(D \leq D_{lim}) = \frac{\sum_{m=1}^M v_m \cdot P_{slot}(D \leq D_{lim}; N_m)}{\sum_{m=1}^M v_m},$$

где $v_m / \sum_{m=1}^M v_m$ — вероятность передачи кадра станцией из RAW-слота m , а $P_{slot}(D \leq D_{lim}; N_m)$ — вероятность передачи кадра не медленнее, чем за D_{lim} в RAW-слоте m .

Таблица 1: Параметры сценария

Параметр	Физический смысл	Значение
l	длина кадра	100 байт
T_{ACK}	длительность кадра подтверждения	240 мкс
T_{SIG}	длительность служебного поля SIG	80 мкс
$T_{PREAMBLE}$	длительность преамбулы физического уровня	160 мкс
N_{DBPS}	число бит, передаваемых в одном OFDM-символе	156 бит
T_{SYMS}	длительность OFDM-символа	36 мкс
$SIFS$	межкадровый интервал	160 мкс
T_e	длительность пустого слота	52 мкс
T_c	длительность коллизийного слота	1064 мкс
T_s	длительность успешного слота	1064 мкс
R	максимальное число повторных попыток передачи	7

5 Численные результаты

В этом разделе приводятся численные результаты оценки точности модели и сравнение ее вычислительной сложности. Положим, что передаются короткие кадры размером l байт, на СКК 8 в канале 2 МГц. При получении численных результатов используется значение T_e по умолчанию, указанное вместе с другими параметрами в табл. 1. Из-за того, что передаются короткие кадры, $T_s = T_c$. Длительность успешного виртуального слота складывается из времени на передачу кадра T_{DATA} , межкадровых интервалов $SIFS$ и $AIFS = SIFS + 3T_e$, и времени на передачу кадра-подтверждения T_{ACK} :

$$T_s = T_{DATA} + SIFS + T_{ACK} + AIFS.$$

Длительность кадра складывается из длительности преамбулы физического уровня $T_{PREAMBLE}$, длительности служебного поля SIG T_{SIG} и времени, затраченного на передачу N_{SYMS} OFDM-символов с коротким защитным интервалом длительностью T_{SYMS} каждый:

$$T_{DATA} = T_{PREAMBLE} + T_{SIG} + T_{SYMS}N_{SYMS}.$$

Для передачи l байт с использованием СКК 4 требуется

$$N_{SYM} = \left\lceil \frac{8 \times l + N_{SERVICE} + N_{TAIL}}{N_{DBPS}} \right\rceil$$

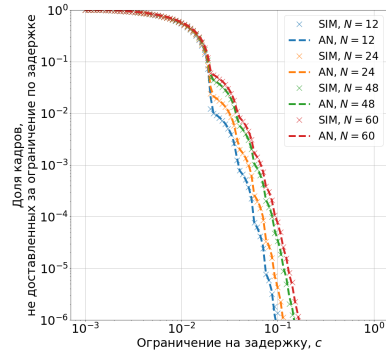
OFDM-символов, где $N_{SERVICE}$ — число бит в поле SERVICE, N_{TAIL} — число хвостовых бит, N_{DBPS} — число бит, передаваемых в одном OFDM-символе.

В отличие от аналитической модели, где предполагается, что повторно отправлять кадры можно бесконечное число раз, в имитационной модели действует ограничение в $R = 7$ попыток передач, по достижении которых

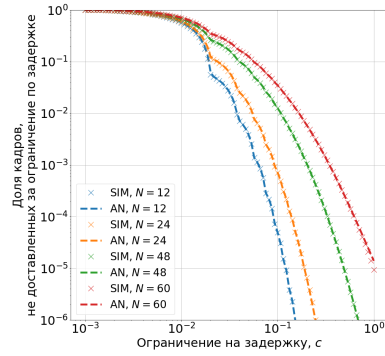
кадр отбрасывается. Подписи «AN» и «SIM» на рис. 2 и 3 соответствуют результатам, полученным с помощью аналитической модели и имитационного моделирования.

Проведем оценку точности полученной модели. На рис. 2 представлены графики зависимости доли кадров, не доставленных за ограничение по времени от величины этого ограничения, для различных параметров сценария. Эти зависимости имеют ступенькообразный вид, причем каждой ступени соответствует число периодов, прошедших от момента генерации кадра на станции до его доставки: вероятность доставить кадр за время первого периода $T_{per} = 18440\text{мкс}$ больше 90% для разреженного трафика и любого числа сенсоров в сети N (см. рис. 2а и 2б). На рис. 2д показано, что для большого CTC происходит недооценивание вероятности доставки за ограничение, связанное с тем, что аналитически задержка кадра считается по концу RAW-слота. Чем больше CTC , тем меньше вероятность генерации кадра в очереди и тем быстрее доставляются кадры из-за того, что почти нет конкуренции. Вместе с ростом λ и N (см. рис. 2в, 2г) увеличивается и количество отброшенных по превышении R кадров в сравнении с отброшенными по превышении допустимой задержки, поэтому значения λ большие, чем 1с^{-1} , не следует рассматривать. Теоретические оценки совпадают с имитационными результатами с точностью до 10^{-4} для указанных значений на рис. 2, относительная ошибка не превышает 15% для $\lambda < 1\text{с}^{-1}$ и $CTC \leq 0,1$ для случаев, где отбрасывание кадров по превышении R заметно меньше, чем по превышении допустимого времени нахождения в очереди.

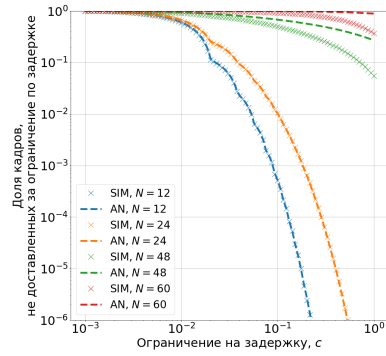
На рис. 3 представлены графики сравнения минимальных значений ограничения на задержку, при которых удается выполнить ограничение на вероятность доставки P_{lim} . При менее строгом ограничении на вероятность доставки минимальное ограничение на задержку меньше, чем при более строгом ограничении на вероятность доставки: для невысокой надежности позволительно большему количеству кадров быть доставленными за время, превышающее ограничение, и наоборот. При увеличении интенсивности λ аналитическая модель переоценивает минимальные значения ограничений на задержку (см. рис. 3а), так как в ней моментом доставки является конец RAW-слота с успешной передачей. Быстрый рост задержки с увеличением интенсивности связан с большим числом активных станций, число которых увеличивается каждый период потому что кадры не успевают передаваться. Для рис. 3б рост задержки связан с тем, что кадров в системе может быть больше из-за увеличивающегося числа станций, на которых они могут генерироваться. Переоценка задержки аналитической моделью, по сравнению с результатами имитационного моделирования, происходит по той же причине, что и для результатов на рис. 3а. Относительные погрешности минимально допустимых значений задержки не превышают 10%. Оценить, при каких параметрах отбрасывание кадров по R будет происходить намного меньше, чем по превышении допустимого времени на передачу, можно следующим образом. Кадр может передаваться максимально $D_{lim} \div T_{per}$ раз. Если все эти попытки коллизионные, то на каждые две станции из сред-



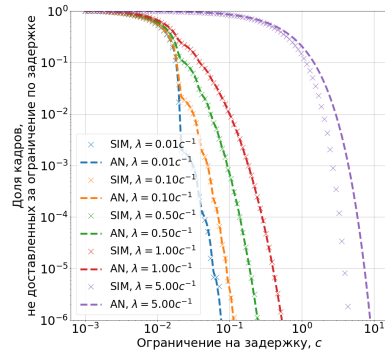
(а) $\lambda = 0,1c^{-1}, CTC = 0,1$



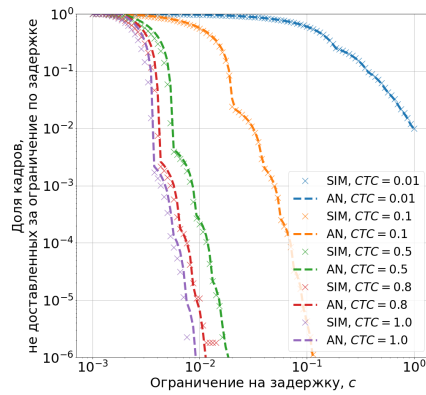
(б) $\lambda = 0,5c^{-1}, CTC = 0,1$



(в) $\lambda = 1,0c^{-1}, CTC = 0,1$



(г) $N = 24, CTC = 0,1$



(д) $\lambda = 0,1c^{-1}, N = 24$

Рис. 2: Графики зависимости доли кадров, не доставленных за ограничение по задержке, от ограничения по задержке, $W_0 = 16, K = W_0 - 1, M = 1, R = 7$.

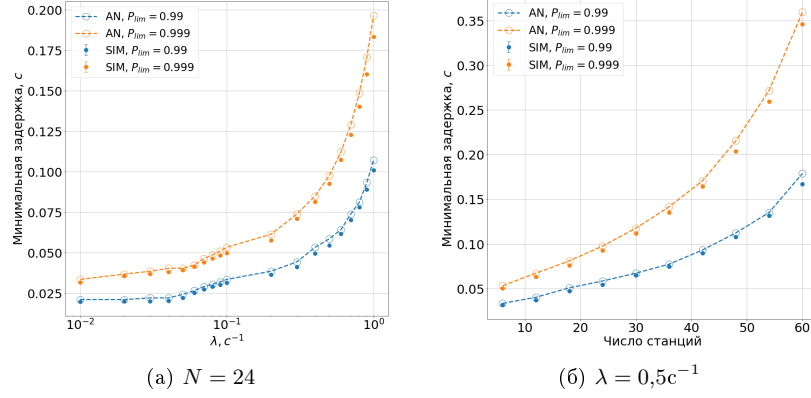


Рис. 3: Результаты сравнения минимальных значений ограничения на задержку, при которых выполняется ограничение на вероятность доставки для $CTC = 0,1$, $W_0 = 16$, $K = W_0 - 1$, $R = 7$ и различных P_{lim} .

него числа активных станций \bar{N} приходится $\frac{D_{lim}}{T_{per}} \div \frac{\bar{N}}{2}$ попыток передачи. Вероятность попасть в коллизию это число раз должна быть меньше, чем отбросить кадр по превышении R :

$$P_c(N, K, W_0)^R > P_c(N, K, W_0)^{\frac{D_{lim}}{T_{per}} \div \frac{\bar{N}}{2}} \iff R < \frac{D_{lim}}{T_{per}} \div \frac{\bar{N}}{2}.$$

Сравним время выполнения подсчета вероятности успешной передачи в RAW-слоте для заданных максимального числа пустых виртуальных слотов K , конкурентного окна W_0 и числа станций N построенной в разделе 4 аналитической модели и модели из [4], описывающей поведение одиночного RAW-слота. Для обеих моделей асимптотической оценкой сложности является $\mathcal{O}(K \log N)$. На рис. 4 представлены результаты сравнения времени выполнения функции подсчета вероятности успешной передачи в RAW-слоте для заданных параметров. Видно, что полученная модель значительно быстрее — в 1000 раз — оценивает вероятность успешной передачи кадра в коротком RAW-слоте. Для рассматриваемого сценария (см. рис. 4а) длина RAW-слота не имеет большого значения: время выполнения почти не меняется. У обеих моделей действительно наблюдается линейный рост с увеличением K (см. рис. 4б), что совпадает с асимптотической оценкой.

Таким образом, полученная аналитическая модель хорошо сходится с результатами имитационного моделирования для разреженного трафика, где почти не происходит отбрасывание кадров по превышении R : для интенсивности, меньшей $1с^{-1}$. Также полученная модель обладает низкой вычислительной сложностью в сравнении с моделью из [4].

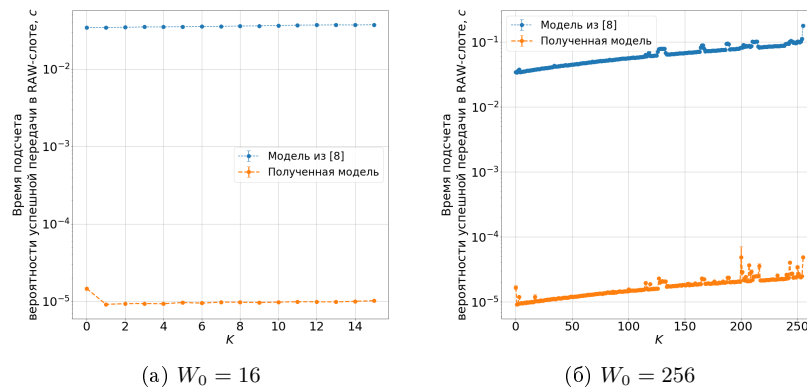


Рис. 4: Результаты сравнения времени подсчета вероятности успешной передачи в RAW-слоте для $N = 25$.

6 Заключение

В данной статье был рассмотрен сценарий передачи разреженного трафика в восходящем канале в беспроводной сенсорной сети с использованием периодического окна ограниченного доступа (PRAW) для случая коротких слотов. Использование механизма окна ограниченного доступа позволяет снизить конкуренцию между станциями и дает право передавать станциям, подавляемым конкуренцией. В стандарте IEEE 802.11ah не дано рекомендаций по поводу выбора оптимальных параметров RAW, которые позволили бы выполнить ограничения, накладываемые на сеть, например, на квантиль задержки, и при этом сэкономить как можно больше канальных ресурсов для передач других станций вне RAW. В данной статье была построена аналитическая модель короткого периодического окна ограниченного доступа, которое является квазиоптимальным — обеспечивающим минимальную среднюю задержку, для разреженного потока трафика. Эта модель позволяет в явном виде найти вероятность, с которой удастся выполнить ограничение на задержку при заданных параметрах механизма и сценария. В отличие от предыдущих моделей RAW, данная модель обладает меньшей вычислительной сложностью, что позволяет ей оперативно реагировать на быстро меняющиеся условия. Найдена область применимости модели, в которой она показывает низкую ошибку.

В дальнейшем авторами данного исследования планируется исследовать оптимизацию параметров метода доступа к каналу с использованием построенной аналитической модели.

Список литературы

1. Enabling the Internet of Things with Wi-Fi HaLow — Performance Evaluation of the Restricted Access Window / Khorov Evgeny, Krotov Alexander, Lyakhov Andrey, Yusupov Ruslan, Condoluci Massimo, Dohler Mischa, and Akyildiz Ian // *IEEE Access*. — 2019. — Vol. 7. — P. 127402–127415.
2. Fast and Reliable Alert Delivery in Mission-Critical Wi-Fi HaLow Sensor Networks / Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, Nasedkin Ivan, Yusupov Ruslan, Famaey Jeroen, and Akyildiz Ian F // *IEEE Access*. — 2020. — Vol. 8. — P. 14302–14313.
3. Resource Allocation for Machine-Type Communication of Energy-Harvesting Devices in Wi-Fi HaLow Networks / Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, and Famaey Jeroen // *Sensors*. — 2020. — Vol. 20, no. 9. — P. 2449.
4. Khorov Evgeny, Krotov Alexander, Lyakhov Andrey. Modelling Machine Type Communication in IEEE 802.11 ah Networks. — 2015. — P. 1149–1154.
5. Improving efficiency of heterogeneous Wi-Fi networks with joint usage of TIM segmentation and restricted access window / Kureev Aleksey, Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, and Lyakhov Andrey // 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) / *IEEE*. — 2017. — P. 1–5.
6. Performance Analysis of Group-Synchronized DCF for Dense IEEE 802.11 Networks / Zheng Lei, Ni Minming, Cai Lin, Pan Jianping, Ghosh Chittabrata, and Doppler Klaus // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. — 2014. — Vol. 13, no. 11. — P. 6180–6192.
7. Throughput Enhancement of Restricted Access Window for Uniform Grouping Scheme in IEEE 802.11 ah / Nawaz Naveed, Hafeez Maryam, Zaidi Syed Ali Raza, McLernon Desmond C, and Ghogho Mounir. — 2017. — P. 1–7.
8. Performance evaluation of IEEE 802.11 ah and its restricted access window mechanism / Raeesi Orod, Pirskanen Juho, Hazmi Ali, Levanen Toni, and Valkama Mikko. — 2014. — P. 460–466.
9. Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, Yusupov Ruslan. Two-slot based model of the IEEE 802.11 ah restricted access window with enabled transmissions crossing slot boundaries. — 2018. — P. 1–9.
10. Analytical Study of Periodic Restricted Access Window Mechanism for Short Slots / Zazhigina Elizaveta, Yusupov Ruslan, Khorov Evgeny, and Lyakhov Andrey // *Electronics*. — 2021. — Vol. 10, no. 5. — Access mode: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/5/549>.
11. Ali M Zulfiker, Mišić Jelena, Mišić Vojislav B. Efficiency of Restricted Access Window Scheme of IEEE 802.11 ah Under Non-Ideal Channel Condition. — 2018. — P. 251–256.
12. Ali M Zulfiker, Mišić Jelena, Mišić Vojislav B. Performance evaluation of heterogeneous IoT nodes with differentiated QoS in IEEE 802.11 ah RAW mechanism // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. — 2019. — Vol. 68, no. 4. — P. 3905–3918.
13. Доставка оповещения о чрезвычайной ситуации в гетерогенной сети Wi-Fi HaLow / Ляхов АИ, Наседкин ИА, Хоров ЕМ, and Юсупов РР // Информационные процессы. — 2019. — Vol. 19, no. 3. — P. 238–248.
14. Vishnevsky Vladimir M, Lyakhov Andrey I. IEEE 802.11 wireless LAN: Saturation throughput analysis with seizing effect consideration // *Cluster Computing*. — 2002. — Vol. 5, no. 2. — P. 133–144.

15. Bianchi Giuseppe. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function // IEEE Journal on selected areas in communications. — 2000. — Vol. 18, no. 3. — P. 535–547.

Исследование влияния отклонения размеров патч-антенны на характеристики реконфигурируемой интеллектуальной поверхности*

Тярин Андрей¹, Алексей Куреев^{1,2}

Email: {tyarin, kureev}@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

² Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики

Аннотация На текущий момент реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (англ.: reconfigurable intelligent surface, RIS) является перспективным устройством для развития беспроводных сетей будущего. RIS состоит из элементарных ячеек, меняя состояние которых, можно управлять отражением входящего сигнала. На данный момент не изучено влияние отклонений размера патч-антенны элементарной ячейки RIS на ее характеристики. Данная работа призвана исследовать это влияние.

Ключевые слова: RIS, CST Studio, PIN-диод, широкополосная связь.

1 Введение

В настоящее время контролируемая радиосреда становится перспективной концепцией для использования в беспроводных сетях будущего. Такой подход уменьшает влияние негативных эффектов в беспроводных каналах, таких как частотно-селективное замирание, отсутствие прямой видимости, многолучевое распространение и т.д. Следовательно, появляется потребность в недорогих и энергоэффективных технологиях, которые могут преодолеть эти эффекты. Одной из таких технологий является реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (англ.: reconfigurable intelligent surface, RIS).

RIS — это плоская структура, которая состоит из элементарных ячеек (англ.: unit cell), где каждая ячейка может задавать требуемый фазовый сдвиг падающей электромагнитной (ЭМ) волне [1]. Таким образом, RIS способна отражать ЭМ волны в нужном направлении, что способствует усилению сигнала на приемном устройстве или, например, подавлению помех.

* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

В результате увеличивается пропускная способность и зона покрытия сети. Поскольку для задания необходимого фазового сдвига требуется небольшое количество энергии, каждая элементарная ячейка практически пассивна, что делает RIS энергоэффективной. Также RIS можно устанавливать на больших поверхностях таких, как стены или потолки внутри помещений, здания и вывески [2].

На текущий момент представлено большое количество прототипов RIS [3,4,5,6]. Однако только в незначительном количестве работ уделяется внимание различным неидеальностям элементарной ячейки, которые приводят к паразитным явлениям. Они могут быть вызваны, например, несоответствием размеров патч-антенн с изначально заданными при изготовлении платы RIS. Однако исследований, посвященных изучению влияния этого явления, обнаружено не было. В данной работе рассматривается элементарная ячейка, основанная на PIN-диодах, — один из наиболее распространенных типов элементарных ячеек; их эффективность показана в работах [3,4]. Также в данной работе исследуется влияние отклонения размеров патч-антенны на характеристики элементарной ячейки RIS.

Дальнейшее изложение работы устроено следующим образом. В разделе 2 описывается общая структура RIS. Затем в разделе 3 приводится описание структуры и моделирования элементарной ячейки RIS для 38 частотного диапазона LTE (band 38), работающей в частотном диапазоне 2595 – 2615 МГц [7]. Далее, в разделе 4 приведены результаты моделирования моделирования АЧХ и ФЧХ элементарных ячеек, у которых есть отклонения в размерах патч-антенны. Раздел 5 завершает данную работу.

2 Строение RIS

Общий вид RIS можно представить следующим образом. RIS является плоской периодической структурой, которая состоит из одинаковых элементов, называемых элементарными ячейками. Общая структура RIS представлена на рис. 1. Именно строение элементарной ячейки определяет основные характеристики и функции RIS. Главными компонентами элементарной ячейки являются управляющий чип (англ.: tunable chip) и отражающий элемент (англ.: reflecting element) [8]. Управляющий чип необходим для изменения таких параметров ЭМ волны как фазовый сдвиг и амплитуда. Отражающий элемент необходим для эффективного отражения ЭМ волны в определенной полосе частот. В качестве управляющего чипа используют PIN-диод [9], варикап [10], радиочастотный переключатель [11]. В качестве отражающего элемента используют металлическую прямоугольную патч-антенну с размерами порядка $\lambda/2$, где λ — длина ЭМ волны, с которой должна взаимодействовать RIS. Более точные размеры патч-антенны и самой элементарной ячейки можно получить в таких средах моделирования, как CST Studio [12], Ansys HFSS [13]. Для дальнейшего моделирования элементарной ячейки RIS используется CST Studio.

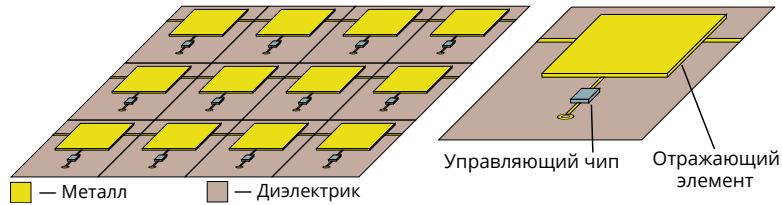


Рис. 1: Структура RIS.

3 Структура и моделирование элементарной ячейки RIS

В данном разделе описывается проектирование и имитационное моделирование элементарной ячейки RIS для LTE band 38 (2595-2615 МГц). На рис. 2 представлена структура данной элементарной ячейки.

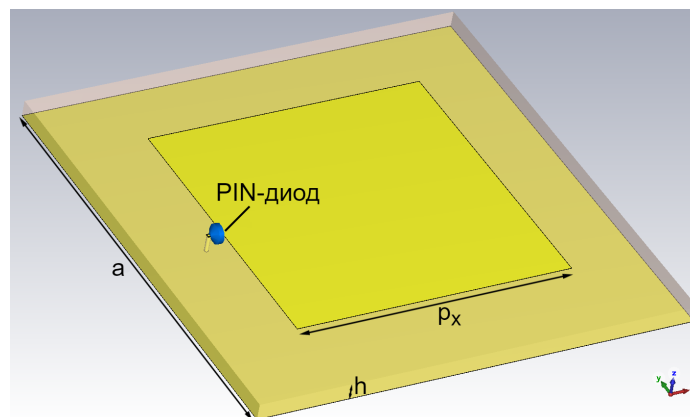


Рис. 2: Структура элементарной ячейки.

На верхнем слое располагаются квадратная металлическая патч-антенна из меди толщиной 35 мкм и PIN-диод (VAR6302VN6327). Нижний слой полностью металлический и используется для заземления. В качестве подложки (средний слой) используется FR-4, который является стандартным материалом при производстве печатных плат с диэлектрической проницаемостью 4,5. Один контакт PIN-диода подключен к краю патч-антенны, а другой подключен к нижнему слою через переходное отверстие с внешним диаметром 0,6 мм и внутренним 0,3 мм. Остальные размеры элементарной

ячейки, которые изображены на рис. 2, обладают следующими значениями $a = 40$ мм, $p_x = 25,2$ мм, $h = 1,5$ мм.

Поскольку PIN-диод обладает только двумя различными состояниями, то он может создать только два различных значения фазовых сдвига. Таким образом можно добиться однобитового квантования по фазе, т.е. принять одно состояние PIN-диода как фазовый сдвиг на 0° , а другое — на 180° . В данной элементарной ячейке, размеры патч-антенны подобраны так, чтобы между двумя состояниями PIN-диода без учета неидеальностей разница фазовых сдвигов составляла 180° в центральной частоте band 38 (2605 МГц). В состоянии прямого смещения (ON) PIN-диод представляет собой эквивалентную схему последовательного подключения резистора ($R = 2$ Ом) и индуктивности ($L = 0,6$ нГн), что представлено на рис. 3(а). В состоянии обратного смещения (OFF) эквивалентная схема PIN-диода является последовательным подключением емкости ($C = 0,3$ пФ) и индуктивности ($L = 0,6$ нГн), что представлено на рис. 3(б). Полноволновое моделирование проводилось в среде CST Studio с граничными условиями в виде других элементарных ячеек. Результаты моделирования в виде ФЧХ и АЧХ элементарной ячейки представлены на рис. 4.

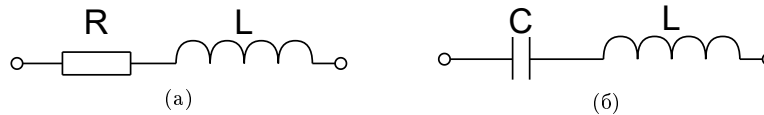


Рис. 3: Эквивалентные схемы PIN-диода в состояниях прямого (а) и обратного (б) смещения.

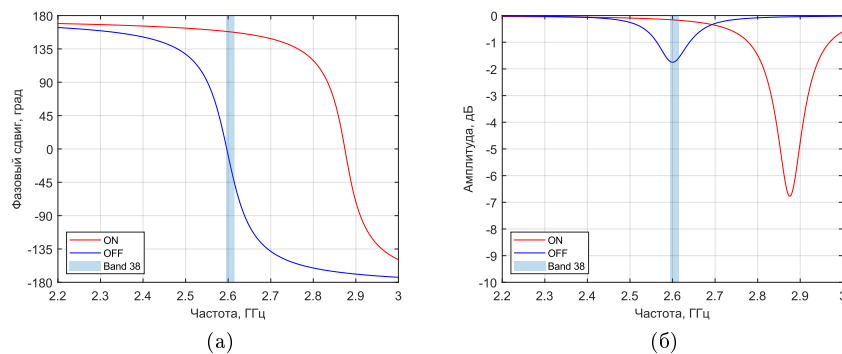


Рис. 4: ФЧХ (а) и АЧХ (б) элементарной ячейки для состояний ON и OFF.

Из результатов моделирования видно, что в центральной частоте 2605 МГц разность фазовых сдвигов между состояниями ON и OFF составляет приблизительно 180° . Однако, на краях band 38 наблюдаются отклонения от идеальных 180° . На частоте 2595 МГц разность фазовых сдвигов составляет приблизительно 154° , а на частоте 2615 МГц — 204° . Значение коэффициента отражения по амплитуде уменьшается на не более чем 0,15 дБ относительно значения в центральной частоте во всей полосе. Так как отклонения фазовых сдвигов от 180° не более 45° или 25% и уменьшение по амплитуде составляет не более 1 дБ, то они считаются в пределах нормы в рамках однобитового квантования по фазе и не должны оказать сильного влияния на работу RIS [14,15].

Данное имитационное моделирование не учитывает неидеальность изготовления печатной платы, из-за которой размеры патч-антенны могут отклоняться от изначальных. Такое явление может повлечь изменения в ФЧХ и АЧХ элементарной ячейки. В следующем разделе изучается его влияние.

4 Исследование влияния отклонения размеров патч-антенны

В данном разделе рассматривается имитационное моделирование элементарной ячейки с неидеальными патч-антеннами. Под неидеальностями патч-антенны в данном случае будем понимать отклонения размеров спроектированной патч-антенны от реальной. Далее исследуется влияние отклонения размеров патч-антенны p_x смоделированной ячейки RIS от произведенной. Данная ошибка связана с неидеальностью производства печатных плат. При изготовлении печатной платы соблюдается определенный класс точности, который и определяет разброс геометрических размеров от идеального значения [16]. Обычно выполняется третий или четвертый класс точности, для которых разброс размеров составляет 0,1 мм и 0,05 мм, соответственно. На рис. 5 представлены результаты моделирования при варьировании размера p_x на 0,1 мм.

Для удобства анализа полученных АЧХ и ФЧХ в таблице 1 представлены значения разностей фазовых сдвигов состояний ON и OFF при варьировании размера p_x для центральной (2605 МГц) и крайних (2595 и 2615 МГц) частот band 38.

Таблица 1: Разности фазовых сдвигов состояний ON и OFF при различных значениях p_x .

Частота, МГц	$p_x=25,1$ мм	$p_x=25,15$ мм	$p_x=25,2$ мм	$p_x=25,25$ мм	$p_x=25,3$ мм
2595	127°	135°	154°	136°	179°
2605	151°	160°	180°	161°	203°
2615	177°	185°	204°	187°	224°

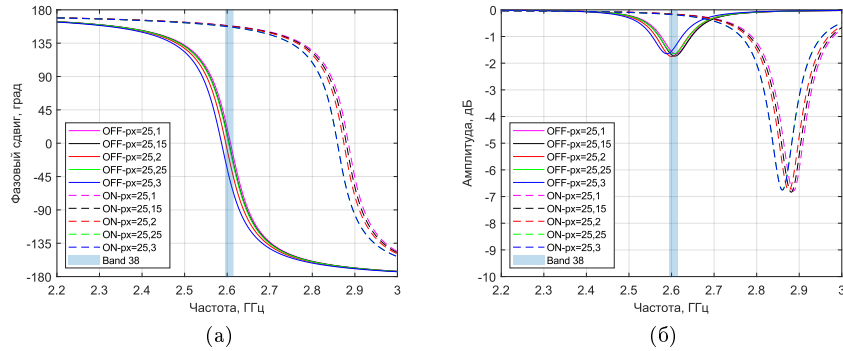


Рис. 5: ФЧХ (а) и АЧХ (б) элементарной ячейки для состояний ON и OFF при варьировании размера патча p_x (указан в мм).

Как видно из результатов моделирования, данное явление приводит к отклонению фазового сдвига от 180° максимум на 53° или $29,4\%$, что уже не в пределах нормы. Значение коэффициента отражения по амплитуде меняется незначительно и уменьшается на не более чем $0,11$ дБ во всей полосе.

5 Заключение

Исследование показало, что при разработке RIS действительно стоит учитывать отклонения размеров патч-антенны. Было продемонстрировано, что данное явление приводит к отклонению фазового сдвига от 180° на значение порядка 30% . Однако в данной работе не исследовалось как отклонение фазового сдвига такого порядка скажется на работе RIS. В дальнейшей работе будет исследоваться влияние данного отклонения на пропускную способность RIS.

Список литературы

1. Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions / Pan Cunhua, Ren Hong, Wang Kezhi, Kolb Jonas Florentin, Elkashlan Maged, Chen Ming, Di Renzo Marco, Hao Yang, Wang Jiangzhou, Swindlehurst A Lee, et al. // IEEE Communications Magazine. — 2021. — Vol. 59, no. 6. — P. 14–20.
2. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities / Liu Yuanwei, Liu Xiao, Mu Xidong, Hou Tianwei, Xu Jiaqi, Di Renzo Marco, and Al-Dhahir Naofal // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2021. — Vol. 23, no. 3. — P. 1546–1577.
3. Space-time-coding digital metasurfaces / Zhang Lei, Chen Xiao Qing, Liu Shuo, Zhang Qian, Zhao Jie, Dai Jun Yan, Bai Guo Dong, Wan Xiang, Cheng Qiang, Castaldi Giuseppe, et al. // Nature communications. — 2018. — Vol. 9, no. 1. — P. 1–11.

4. Beam Scanning at Ka-Band by Using Reflective Programmable Metasurface / Xiao Qiang, Zhang Ying Zhe, Iqbal Shahid, Wan Xiang, and Cui Tie Jun // 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) / IEEE. — 2019. — P. 1–3.
5. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: Antenna design, prototyping, and experimental results / Dai Linglong, Wang Bichai, Wang Min, Yang Xue, Tan Jingbo, Bi Shuangkaisheng, Xu Shenheng, Yang Fan, Chen Zhi, Di Renzo Marco, et al. // IEEE access. — 2020. — Vol. 8. — P. 45913–45923.
6. A prototype of reconfigurable intelligent surface with continuous control of the reflection phase / Fara Roman, Ratajczak Philippe, Phan-Huy Dinh-Thuy, Ourir Abdelwaheb, Di Renzo Marco, and De Rosny Julien // IEEE Wireless Communications. — 2022. — Vol. 29, no. 1. — P. 70–77.
7. 36.101 3GPP TS. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception.
8. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: A contemporary survey / Gong Shimin, Lu Xiao, Hoang Dinh Thai, Niyato Dusit, Shu Lei, Kim Dong In, and Liang Ying-Chang // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2020. — Vol. 22, no. 4. — P. 2283–2314.
9. Amri Muhammad Miftahul, Tran Nguyen Minh, Choi Kae Won. Reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications: adaptive beamforming and experimental validations // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — P. 147442–147457.
10. Reconfigurable intelligent surface (ris) in the sub-6 ghz band: Design, implementation, and real-world demonstration / Araghi Ali, Khalily Mohsen, Safaei Mahmood, Bagheri Amirmasood, Singh Vikrant, Wang Fan, and Tafazolli Rahim // IEEE Access. — 2022. — Vol. 10. — P. 2646–2655.
11. ScatterMIMO: Enabling virtual MIMO with smart surfaces / Dunna Manideep, Zhang Chi, Sievenpiper Daniel, and Bharadia Dinesh // Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. — 2020. — P. 1–14.
12. CST STUDIO SUITE®, CST AG, Germany, www.cst.com.
13. High Frequency Structure Simulator (HFSS), Ansoft Corporation, Pittsburgh.
14. 60-GHz electronically reconfigurable large reflectarray using single-bit phase shifters / Kamoda Hirokazu, Iwasaki Toru, Tsumochi Jun, Kuki Takao, and Hashimoto Osamu // IEEE transactions on antennas and propagation. — 2011. — Vol. 59, no. 7. — P. 2524–2531.
15. 60-GHz electrically reconfigurable reflectarray using pin diode / Kamoda Hirokazu, Iwasaki Toru, Tsumochi Jun, and Kuki Takao // 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest / IEEE. — 2009. — P. 1177–1180.
16. ГОСТ, Р. 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции // Москва: Стандартинформ. — 2010.

Экспериментальное исследование механизма интервала тишины в устройствах Wi-Fi

Андрей Баранников^{1,2}, Илья Левицкий²

{barannikov, levitsky}@wireless.iitp.ru

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

Аннотация Постоянно растет количество устройств, использующих технологию Wi-Fi. Вместе с этим расширяются сферы эксплуатации таких устройств. От безошибочности работы целого спектра систем, использующих Wi-Fi, зависит безопасность людей. Работа таких устройств как автомобили с автопилотом, дроны и станки с дистанционным управлением требует очень надежное и быстрое Wi-Fi соединение для обслуживания трафика реального времени (англ.: Real Time, RT). Для обеспечения высоких требований трафика реального времени в дополнении IEEE 802.11be к стандарту IEEE 802.11, описывающему технологию Wi-Fi 7, вводится новый механизм R-TWT (англ.: restricted Target Wake Time). Он позволяет точке доступа и станции составлять расписание периодов передачи, во время которых станция может передать RT-трафик с большей вероятностью. Однако механизм должен функционировать даже при наличии в сети устройств, не поддерживающих данный механизм. Чтобы реализовать такую совместимость, требуется исполнение устройствами механизма интервалов тишины (англ.: quiet interval). Отсутствие реализации заявленного механизма в современных устройствах может поставить под вопрос эффективность механизма R-TWT и, как следствие, возможность обслуживания трафика реального времени. В данной работе исследуется зависимость поведения реальных устройств от параметров настройки механизма интервалов тишины. Для проведения измерений собран экспериментальный стенд на основе программно-определяемого радио. Обнаружено, что ни одно из исследуемых устройств не выполняют в полной мере определенный стандартом функционал, необходимый для реализации R-TWT. Выявленные несоответствия между работой механизма интервалов тишины наблюдаемой в реальных устройствах и описанной в стандарте ставят под вопрос возможность гибкого и уверенного использования R-TWT при его текущей реализации.

Ключевые слова: quiet interval, R-TWT, Wi-Fi, трафик реального времени

* Исследование выполнено в ИПФИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00788, <https://rscf.ru/project/20-19-00788/>

1 Введение

На сегодняшний день существует большое число устройств, использующих технологию Wi-Fi. С каждым днем технология Wi-Fi находит все больше применений в разных сферах человеческой деятельности. Особого внимания заслуживают системы, от безошибочной работы которых зависит безопасность людей. В пример можно привести автомобили с автопилотом, беспилотные летательные аппараты и станки с дистанционным управлением. Подобные устройства требуют очень надежное и быстрое Wi-Fi соединение для обслуживания трафика реального времени (англ.: Real Time, RT). Такой трафик используют устройства, для которых критически важно вовремя и без искажений получить предназначенные им данные. В связи с этим RT-трафик накладывает жесткие ограничения на задержку передачи данных (1-10 мс в зависимости от сценария), а также на надежность передачи данных (вероятность неудачной передачи данных должна быть не более чем 10^{-5}).

Требования RT-трафика трудновыполнимы в существующих сетях Wi-Fi, которые используют метод случайного доступа к каналу. Согласно этому методу, прежде чем отправить кадры, станции конкурируют между собой за право использовать канал. Если станция получила право на использование канала, в назначенный ей промежуток времени никто другой не может начать передачу. При такой реализации станция, генерирующая RT-трафик, точно так же как и остальные будет участвовать в конкуренции за канал, что может привести к существенным задержкам при передаче данных. Существующий механизм приоритизации трафика, механизм улучшенного распределенного доступа к каналу (англ.: enhanced distributed channel access, EDCA), способен уменьшить задержку. Однако удовлетворить требования к обслуживанию RT-трафика он все равно не может, так как эффективность вышеупомянутого механизма зависит от количества устройств.

Для более эффективного доступа к каналу при обслуживании RT-трафика в сетях Wi-Fi 7, в дополнении IEEE 802.11be к стандарту IEEE 802.11 вводятся механизмы для поддержки RT-трафика, в частности — механизм целевого времени активности с ограничением доступа к каналу (англ.: restricted Target Wake Time, R-TWT). Механизм R-TWT основан на уже существующем механизме в сетях Wi-Fi — TWT. Механизм TWT позволяет точке доступа и станции составлять расписание периодов передачи, когда станция активна и готова к обмену данными. Однако механизм TWT не гарантирует, что в обозначенный интервал канал будет свободен. Усовершенствованный механизм R-TWT сохраняет все аспекты оригинального механизма TWT, добавляя правила, согласно которым станциям запрещается осуществлять передачи, пересекающие начало согласованного интервала.

Когда поддержка механизма R-TWT станет доступной в коммерческих устройствах, в использовании еще будут оставаться устройства прошлых поколений. Эти устройства не будут понимать сообщения об использовании R-TWT и потому могут нарушить ограничение доступа к каналу. Чтобы этого избежать предлагается использовать механизм интервалов тишины

[1], введенный в дополнении IEEE 802.11h к стандарту IEEE 802.11. В течении интервала тишины текущий канал считается занятым виртуально, и станциям запрещено осуществлять передачу кадров. С помощью интервалов тишины можно изолировать начала периодов R-TWT от передач существующих устройств, которые новый механизм не поддерживают. Таким образом осуществляется обратная совместимость с устройствами, не поддерживающими R-TWT, при разработке нового механизма поддержки RT-трафика.

На сегодняшний день все устройства, выпускаемые согласно технологии Wi-Fi, проходят проверку соответствия стандарту. Однако у производителей есть свобода выбора методов реализации описанных в стандарте механизмов. Это позволяет им самостоятельно адаптировать разработки к особенностям реальных сценариев использования устройств. Точно так же реализация ранее упомянутого механизма интервалов тишины отличается для каждого производителя сетевого оборудования. Не исключены случаи, когда важная часть стандарта поддерживается частично или не поддерживается вовсе. При разработке механизма обратной совместимости для R-TWT из актуального стандарта, в реализации которого используется механизм интервалов тишины из предшествующего стандарта, нужно учитывать эту особенность.

В данной работе экспериментально исследуется поддержка устройствами механизма интервалов тишины в объеме, требуемом для обслуживания RT-трафика. В рамках работы анализируется влияние параметров механизма интервалов тишины на поведение устройств. Особое внимание уделяется сравнению поведения устройств в случае использования интервала тишины, исследованию одновременного соблюдения устройствами нескольких разных интервалов тишины, а также исследованию строгого соблюдения устройствами интервала тишины длительностью 1 TU (англ.: Time Unit, 1024 мкс), требуемого механизмом R-TWT.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 проведен обзор литературы, в разделе 3 описан исследуемый механизм интервалов тишины, в 4 разделе описаны установка, проведение эксперимента и обработка экспериментальных данных. Раздел 5 посвящен численным результатам. В разделе 6 представлены выводы.

2 Обзор литературы

Существует большое количество работ, исследующих интервал тишины с разных сторон. В первую очередь интервал тишины часто исследуется в рамках изучения атак на сеть Wi-Fi. Этому посвящено наибольшее количество экспериментальных работ об интервале тишины. В работе [2] авторами проведено исследование работы механизма интервалов тишины для разных комбинаций чипов Wi-Fi и операционных систем. Целью исследования было выявить возможности для атак на сеть Wi-Fi с помощью рассылки поддельных биконов. Из шести изученных комбинаций чипов Wi-Fi и операционных систем два исполнили интервал тишины в полной мере, два только частич-

но ограничили передачу на время интервала тишины и еще два ограничили передачу лишь на первые 10% времени. Методология проведения эксперимента воспроизводит атаки на работающую сеть, и таким способом нельзя выяснить, исполняют ли устройства в сети без перебоев интервал тишины согласно стандарту. Также в работе изучается блокировка передач от устройств длинными интервалами тишины порядка секунд, и не рассматриваются короткие интервалы тишины менее 10 мс, характерные для R-TWT. Кроме того, не изучена поддержка устройствами нескольких интервалов тишины.

В работе [3] также рассмотрены атаки с помощью поддельных биконов. Эксперименты проводятся с современными устройствами, однако методика проведения исследования недостаточно точно описана. В дополнение к ограничениям в работе [2], для проверки работы механизма интервалов тишины используются невалидные параметры, поэтому результаты этой работы касательно рассматриваемого механизма нельзя считать достоверными.

Кроме безопасности, механизм интервалов тишины используют для улучшения работы других механизмов. Работа [4] экспериментально исследует интервал тишины как инструмент снижения конкуренции, приоритизации или разделения трафика. Здесь большое внимание уделяется возможности точки доступа адаптивно формировать интервалы тишины для синхронизации периодов передачи разных станций с учетом шума в канале. Эта работа теоретическая и не раскрывает имплементацию механизма в устройствах. Также здесь не рассматриваются короткие интервалы тишины и использование нескольких интервалов тишины.

Дополнительно стоит упомянуть работы, исследующие различия между описанными в стандарте механизмами и их реализацией в реальных устройствах. Например, известны случаи, когда некоторые производители внедрили в свои устройства эффект захвата. Этот эффект позволяет устройствам не закончив текущий прием начать прием другого, более мощного по уровню сигнала кадра. Результаты исследований [5] и [6] показывают, что подобное отклонение от стандарта широко распространено, а работа [7] дополнительно показывает, что в некоторых случаях эффект захвата может привести к заметному приросту пропускной способности.

Еще один случай отклонения от стандарта описан в работе [8]. В ней изучено поведение устройств Wi-Fi при наличии в канале интерференции, экспериментально измерены значения межкадровых интервалов, а также счетчиков отсрочки (англ.: backoff counter), используемых в методе случайного доступа к каналу. Результаты показывают, что при высоком значении шума в канале протестированные устройства не ожидают требуемый межкадровый интервал, а сразу начинают считать отсрочку. Такой эффект противоречит заданному в стандарте поведению и может привести к неравномерному распределению ресурсов в канале в сценариях с сильной интерференцией.

В связи с вышесказанным является актуальным экспериментальное исследование соблюдения устройствами коротких интервалов тишины и иссле-

дование одновременного соблюдения устройствами нескольких интервалов тишины.

3 Механизм интервалов тишины

Механизм интервалов тишины был введен в дополнении IEEE 802.11h к стандарту IEEE 802.11. Он был введен с целью измерения канала для определения в нем сигнала от посторонних устройств, например, радаров. Согласно стандарту в течение интервала тишины станции должны хранить молчание, т.е. не отправлять никаких сообщений, чтобы можно было провести измерение канала. Наличие такого механизма необходимо при использовании устройствами Wi-Fi нелецензированных частот. С введением механизма R-TWT в дополнении 802.11be механизм интервалов тишины получил новую функцию — ограничивать передачу от устройств прошлых поколений в начале периодов передачи RT-трафика.

Расписание интервалов тишины опирается на целевое время передачи биконов (англ. target beacon transmission time, ТВТТ) и определяется элементом тишины (англ. Quiet Element). Он используется в биконах - периодически рассылаемых точкой доступа кадрах для управления беспроводной сетью. Формат элемента тишины имеет следующие поля (см. рис. 1):

Quiet Count	Quiet Period	Quiet Duration	Quiet Offset
-------------	--------------	----------------	--------------

Рис. 1: Поля элемента тишины.

- Quiet Count — определяет количество биконов перед интервалом тишины, измеряется в бикон-интервалах (БИ);
- Quiet Period — определяет количество биконов между интервалами тишины, измеряется в БИ;
- Quiet Duration — определяет продолжительность интервала тишины, измеряется в TU;
- Quiet Offset - смещение начала интервала тишины относительно ТВТТ, измеряется в TU.

Конфигурируя все вышеперечисленные поля, можно определить интервал тишины или целое расписание (см. рис. 2). Интеграция получившегося элемента тишины в бикон дает возможность проверить соблюдение устройствами исследуемого механизма интервалов тишины. Стандарт также разрешает использование нескольких элементов тишины для настройки нескольких разных интервалов. Кроме того, ожидается, что R-TWT часто будет использовать несколько разных периодов, и потому поддержка одновременно нескольких разных интервалов тишины критична.

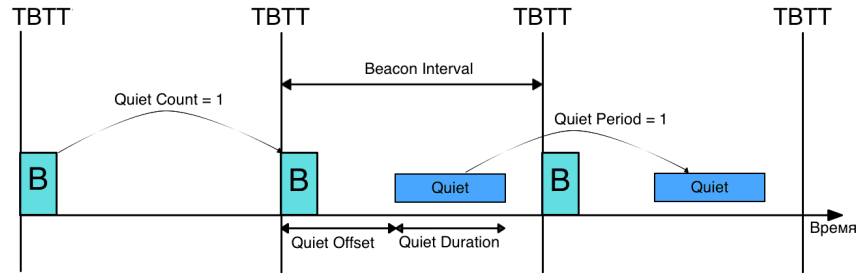


Рис. 2: Схема работы механизма интервалов тишины.

4 Описание эксперимента

Для проведения эксперимента был собран экспериментальный стенд с использованием следующего оборудования:

- *Тестируемое устройство* - устройство, поведение которого изучается;
- *Монитор* - устройство, прослушивающее кадры Wi-Fi в заданном канале;
- *USRP (Universal Software Radio Peripheral)* - универсальная программно-определяемая система [9];
- *ТД* - беспроводная точка доступа Wi-Fi.

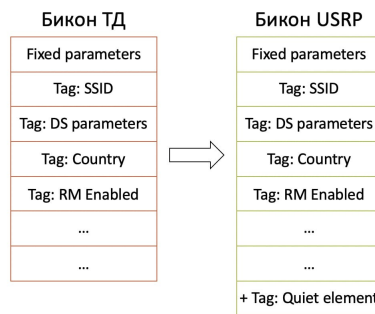


Рис. 3: Схема интеграции элемента тишины в бикон

Как было упомянуто выше, исследуемый интервал тишины задается элементом тишины, который является информационным элементом бикона. Суть эксперимента состоит в замене обычного бикона, рассылаемого беспроводной точкой доступа, на бикон, рассылаемый USRP. В бикон, рассылаемый USRP, будет встроен элемент тишины, задающий нужный для исследования интервал тишины (см рис. 3).



Рис. 4: Первый этап. USRP слушает биконы от ТД.

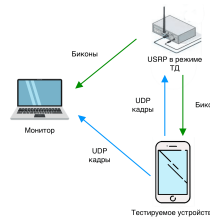


Рис. 5: Второй этап. USRP отправляет свои биконы с измененным содержанием.

Эксперимент состоит из двух этапов. На **первом этапе**, схема которого представлена на рис. 4, тестируемое устройство подключено к ТД и передает на нее насыщенный UDP-поток. UDP-кадры используются, так как они не требуют подтверждения на транспортном уровне, что облегчает разработку ПО для USRP. Монитор захватывает переданные с Тестируемого устройства и ТД кадры с помощью программы анализатора трафика Wireshark [10]. USRP работает в режиме монитора и прослушивает канал, в том числе и биконы, рассылаемые ТД. Каждый последний бикон USRP сохраняет в память, чтобы потом на основе него сформировать собственный с заданными параметрами. Переход ко второму этапу осуществляется отключением ТД.

Когда USRP обнаруживает, что ТД отключена, начинается **второй этап**, схема которого приведена на рис. 5. Теперь USRP рассылает подтверждения кадров данных и биконы с настраиваемым содержанием. Монитор захватывает данные с USRP и тестируемого устройства для последующего анализа. При правильной настройке USRP тестируемое устройство не замечает разницы между биконами от ТД и биконами от USRP, что позволяет успешно совершать инъекцию конфигурируемых биконов.

Биконы отправляются с интервалом, заданным точкой доступа. В ходе эксперимента это значение всегда равнялось 100 TU. Насыщенный UDP-трафик для всех устройств генерируется идентичным скриптом. Размер каждого кадра данных 1000 байт. Несмотря на то, что устройства генерируют насыщенный трафик, частота отправки кадров данных варьируется для разных устройств, так как они используют разные сигнально-кодированные конструкции, и длительность кадров различается.

Обработка экспериментальных данных

По результатам каждого проведенного эксперимента получены записи всех отсылаемых в канале кадров. Из полной записи выделяется отрезок со вторым этапом эксперимента. Из полученной записи выделяются все биконы. Для каждого бикона по моменту его отправки подсчитывается начало и

конец бикон-интервала, на котором должен выполняться указанный в биконе интервал тишины. Для этого ко времени отправки бикона прибавляется длительность БИ и полученный момент времени рассматривается как начало БИ, длительностью 100 TU. Для каждого БИ время отсчитывается от начала БИ и измеряется в TU. Далее вычисляется количество кадров, отправленных устройством в каждый TU, эту величину назовем интенсивностью потока кадров. В результате для каждого БИ подсчитывается зависимость интенсивности потока кадров от времени с начала БИ. В конце данные о количестве отправленных кадров усредняются по всем БИ. По этим данным строится график зависимости интенсивности кадров от времени с начала БИ.

В дополнение к графикам, иллюстрирующим усредненные данные, используется график, рассматривающий отдельный временной отрезок записи эксперимента длиной 2 БИ. Его использование обусловлено необходимостью объяснения несоответствия интенсивности исполнения интервалов тишины описанному в стандарте.

5 Численные результаты

Информация о всех тестируемых устройствах представлена в таблице 1, а результаты исследования сведены в таблицу 2. Все исследуемые устройства продемонстрировали одинаковое поведение в идентичных экспериментах. Вероятно, это связано с их общей программной базой. Исходя из этого они будут рассмотрены как единая группа, для каждого члена которой поведение соответствует нижеизложенному.

Таблица 1: Информация о тестируемых устройствах.

№	Устройство	Чип Wi-Fi	ОС
1	Apple MacBook Air 2012	Broadcom BCM43xx 1.0(0x14E4, 0xE9)	macOS Catalina 10.15.7
2	iPad Pro 2018	Murata/Apple 339S00551	IOS 15.3.1
3	iPhone 12	USI 339S00761	IOS 15.3.1

Таблица 2: Результаты исследования выполнения механизма интервалов тишины.

№	При каких значениях [Count/Period] интервал тишины выполняется	Поддержка короткого интервала тишины 1 TU	Поддержка нескольких интервалов тишины
1	1/0 и 1/1, выполняется через кадр	да	нет
2	1/0 и 1/1, выполняется через кадр	да	нет
3	1/0 и 1/1, выполняется через кадр	да	нет

Первый эксперимент проверяет наличие поддержки устройством интервала тишины при использовании значений элемента тишины удобных для анализа. Прежде чем исследовать интервал тишины с точки зрения механизма реализации R-TWT, нужно убедиться, что устройство реализует интервал тишины в простых сценариях, без специфики R-TWT. Если триви-

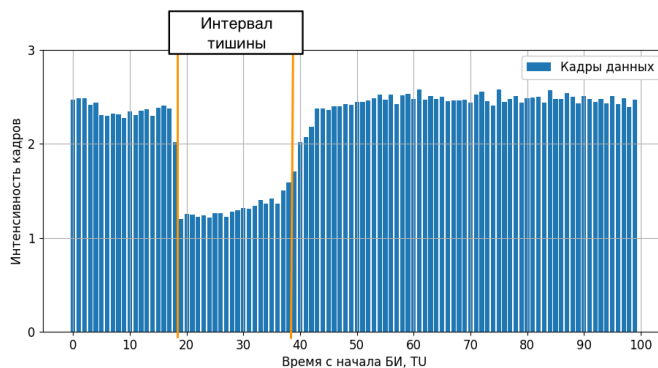


Рис. 6: График усредненной по всем БИ интенсивности для исследуемых устройств.

альный интервал тишины не будет исполняться согласно стандарту, дальнейшие эксперименты не имеют смысла.

Исследованные устройства корректно исполняют одиночный интервал тишины в соответствии со всеми полями элемента тишины кроме периодичности. Периодичность исполнения не принимает некоторые допустимые стандартом величины. Максимальная частота исполнения интервалов тишины, которой удалось добиться, каждый второй БИ. На графике зависимости усредненной по всем БИ интенсивности передачи от времени, представленном на рис. 6, видно снижение интенсивности передачи кадров примерно в два раза вместо снижения до нуля. Это связано с исполнением интервала тишины через БИ. График на рис. 7 демонстрирует частоту исполнения интервалов тишины для исследуемых устройств. На нем рассмотрен интервал с двумя соседними БИ, как и сказано выше, из двух кадров интервал тишины выполнен только для одного. Возвращаясь к графику на рис. 6, уделим

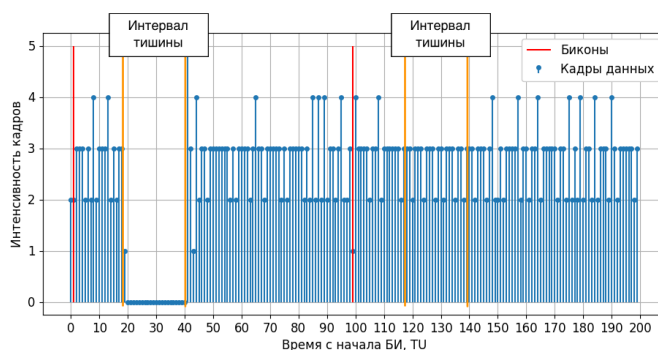


Рис. 7: Промежуток длиной 2 БИ с интервалом тишины на каждом из них для исследуемых устройств.

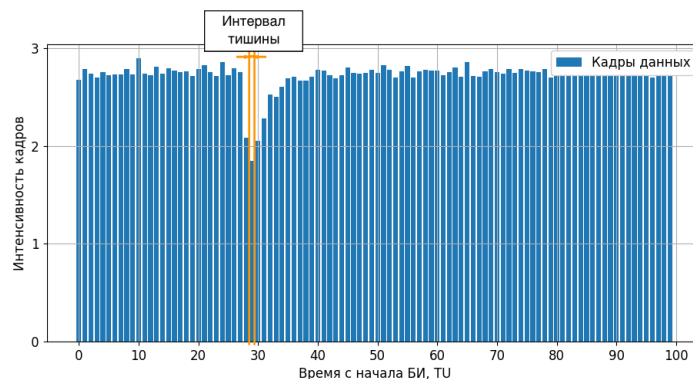


Рис. 8: График усредненной по всем БИ интенсивности для исследуемых устройств при длине интервала 1 TU.

внимание еще одной детали. Вместо плато на протяжении всего интервала тишины наблюдается короткий участок постоянной интенсивности и затем плавный рост. Это объясняется тем, что часто устройства начинают отправку данных до завершения интервала тишины. Из-за этого наблюдаемая длина интервала тишины варьируется от 10 до 20 TU вместо заданных 20 TU, что отражается на графике нечёткой границей конца интервала тишины. Следующий эксперимент исследует интервал тишины длиной 1 TU. Заданный момент времени начала интервала тишины для рассматриваемого эксперимента — 29 TU, Offset 30 TU отсчитывается от ТВТГ. На характерном графике для этого случая на рис. 8 видно, что самая низкая интенсивность приходится на момент 29 TU. Снижение интенсивности в момент времени 28 TU вызвано отказом станции от передачи, так как ожидается пересечение с интервалом тишины. Плавный рост интенсивности вместо резкого скачка для нескольких последующих моментов времени показывает, что, как и в предыдущем эксперименте, устройство не всегда эффективно исполняет заданную длину интервала тишины, иногда возобновляя передачу данных позже окончания интервала.

Последний эксперимент исследует применение нескольких интервалов тишины. Характерный график для такого поведения устройств представлен на рис. 9. Первый по порядку записи в бикон элемент тишины задавал интервал тишины с 19 до 29 TU, а второй по порядку элемент тишины задавал интервал с 69 до 79 TU соответственно. На графике видно, что исполняется только один элемент тишины, первый по порядку записи в биконе. Это означает, что исследуемые устройства не поддерживают исполнение более одного интервала тишины.

6 Заключение

В рамках работы изучено влияние элементов тишины с различными параметрами в биконах на поведение устройств Wi-Fi. По результатам эксперимента было выявлено, что исследуемые устройства исполняют одиночный

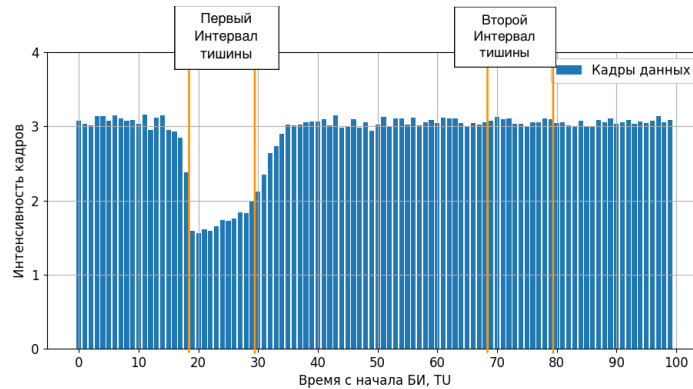


Рис. 9: График усредненной по всем БИ интенсивности для исследуемых устройств при использовании двух интервалов тишины.

интервал тишины с отклонениями от стандарта, не выполняя длину интервала. Более того, устройства не исполняют более одного интервала тишины, что является несоответствием стандарту. Итоги работы показывают, что на данный момент в том виде, в котором R-TWT описан в стандарте, с использованием механизма интервалов тишины он не может быть реализован в полной мере.

Список литературы

1. "IEEE standard 802.11h-2003, Amendment 5: Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5 GHz band in Europe."
2. B. Könings, F. Schaub, F. Kargl, and S. Dietzel, "Channel switch and quiet attack: New DoS attacks exploiting the 802.11 standard," in *2009 IEEE 34th Conference on Local Computer Networks*, pp. 14–21, 2009.
3. J. van Brakel, "Availability analysis of SURFwireless," 2019.
4. K. Piamrat and P. Fontaine, "Client protection in wireless home networks," in *2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics -Berlin (ICCE-Berlin)*, pp. 34–38, 2011.
5. E. Khorov, A. Kureev, I. Levitsky, and A. Lyakhov, "Testbed to Study the Capture Effect: Can We Rely on this Effect in Modern Wi-Fi Networks," in *2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pp. 1–5, 2018.
6. E. Endovitskiy, E. Khorov, A. Kureev, and I. Levitsky, "Demo: Experimental Study of Capture Effect in Smartphones and Wi-Fi Access Points," in *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, pp. 1–2, 2020.
7. P. Patras, H. Qi, and D. Malone, "Exploiting the capture effect to improve WLAN throughput," in *2012 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pp. 1–9, 2012.

8. А.Пойда, А.Куреев, and Е.Ендовицкий., “Исследование скорости передачи данных и поведения устройств Wi-Fi в условиях сильной интерференции,” in *Сборник трудов 45-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН Информационные технологии и системы*, ИППИ РАН, 2021.
9. “National Instruments. — Device specifications NI USRP-2944R : 10 MHz to 6 GHz Tunable RF Transceiver,” 2016.
10. “The Wireshark team. — Wireshark Documentation.” <https://www.wireshark.org/docs/>, 2022.

Анализ эффективности прямых соединений во вторичном канале при обслуживании VR-трафика в сетях Wi-Fi *

М.А. Мирзоян^{1,2}, Е.С. Корнеев^{1,2}, В.А. Логинов¹

{mirzoian, korneev, loginov}@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский
университет)

Аннотация Популярность приложений виртуальной реальности (англ.: virtual reality, VR) в последние годы заметно растет, а VR-гарнитуры становятся все более доступными. Для связи VR-гарнитуры с VR-сервером часто используются технологии беспроводной связи, например, Wi-Fi. Интерактивная природа приложений VR накладывает строгие ограничения на время и надёжность доставки трафика, труднодостижимые при использовании современных методов доступа к среде. В данной работе исследуется новый метод доступа к среде M-TDLS, позволяющий точке доступа Wi-Fi выделять в течение своей передачи вторичный канал для VR-трафика. При помощи имитационного моделирования было показано, что метод M-TDLS повышает надёжность передачи VR-трафика, причем в некоторых сценариях это достигается без ухудшения эффективности обслуживания фоновых трафика.

Ключевые слова: TDLS, прямые соединения, вторичный канал, виртуальная реальность, Wi-Fi Direct

1 Введение

В настоящее время большое распространение получили интерактивные приложения виртуальной реальности (англ.: virtual reality, VR) [1–3]. При обслуживании трафика приложений VR необходимо выполнять строгие требования на максимально допустимую задержку и долю потерянных кадров, так как их невыполнение может приводить к ухудшению самочувствия пользователей.

Для наилучшего погружения в виртуальную реальность обычно применяются беспроводные VR-гарнитуры, использующие Wi-Fi, что значительно

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект №20-19-00788).

усложняет задачу передачи данных VR-приложений из-за возможной интерференции от других устройств. Кроме того, высокие требования к задержке диктуют строгие ограничения на задержку между VR-сервером, генерирующим видеопоток, и VR-гарнитурой, в связи с чем наиболее распространенным является сценарий, когда VR-сервер работает в той же Wi-Fi-сети, что и VR-гарнитура. Нужно отметить, что по умолчанию в инфраструктурных сетях Wi-Fi любая передача данных между любыми двумя устройствами будет проходить через точку доступа, т.е. для передачи одного пакета будет необходимо дважды получать доступ к среде, один раз для источника данных и один раз для точки доступа.

Для уменьшения накладных расходов было разработано дополнение IEEE 802.11z к стандарту Wi-Fi, позволяющее устройствам, находящимся в одной локальной сети, устанавливать прямые соединения (англ.: direct links) при помощи метода доступа из технологии TDLS (англ.: Tunneled Direct Link Setup). При его использовании устройства могут передавать данные друг другу напрямую, без участия точки доступа.

Для повышения пропускной способности современные устройства Wi-Fi используют для передачи широкие каналы, например, 40 МГц. При этом устройство выбирает один из каналов шириной 20 МГц в качестве основного канала (англ.: primary channel), в котором оно выполняет процедуру отсрочки, а второй канал считается вторичным каналом (англ.: secondary channel). По окончании процедуры отсрочки точка доступа передает в основном канале, а также во вторичном канале, если он был свободен в течение интервала PIFS перед окончанием процедуры отсрочки в основном канале. В результате, точка доступа может передавать в двух каналах сразу.

Ранее в [4] была предложена модификация метода TDLS, названная M-TDLS. При его использовании точка доступа после получения доступа к каналу шириной 40 МГц выделяет вторичный канал станциям, использующим прямое соединение, а сама использует основной канал. Предполагается, что метод M-TDLS дает выигрыш в спектральной интенсивности сигнала и уменьшает задержку доступа к среде по сравнению с последовательными передачами точки доступа и станций, работающих с использованием метода TDLS.

Несмотря на то, что метод TDLS уже хорошо исследован, в литературе отсутствуют работы, посвященные оценке эффективности метода M-TDLS, хотя он может значительно увеличить число сценариев, в которых можно обеспечить выполнение требований к качеству обслуживания VR-трафика.

В данной работе решается задача анализа производительности метода M-TDLS при одновременном обслуживании точкой доступа VR- и HTTP-трафика. Для этого впервые разрабатывается модель метода M-TDLS в среде имитационного моделирования NS-3 [5], а также проводится сравнение с методами TDLS и методом доступа по умолчанию. При помощи разработанной модели показана область сценариев, в которых метод M-TDLS, в отличие от метода TDLS и метода по умолчанию, позволяет обеспечить требования к качеству обслуживания VR-трафика.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. Раздел 2 содержит обзор литературы, посвященной исследованию прямых соединений в сетях Wi-Fi. В разделе 3 приведено описание рассматриваемого метода M-TDLS. Раздел 4 посвящен описанию исследуемого сценария. В разделе 5 представлены результаты имитационного моделирования рассматриваемых методов. Раздел 6 содержит заключение.

2 Обзор литературы

Возможность использования прямых соединений в сетях Wi-Fi исследовалась во многих работах. Предлагаемые системы строились с применением различных технологий, среди которых выделяются TDLS и Wi-Fi Direct.

Технология TDLS была добавлена в программу сертификации Wi-Fi Alliance в 2012 году. Данная технология была разработана для более быстрой передачи данных в тех случаях, когда пересылка данных через точку доступа оказывается невыгодной [6]. Технология TDLS исследовалась во множестве работ, но многие из них были посвящены не обеспечению качества обслуживания, а, например, вопросам безопасности устанавливаемого соединения [7, 8].

Близкой к технологии TDLS является технология Wi-Fi Direct, которая была сертифицирована Wi-Fi Alliance [9] в 2010 году. Существуют работы, изучающие свойства метода доступа из этой технологии, например, время установления соединения [10], или предлагающие алгоритмы оптимального выбора лидера группы [11]. Особого внимания в рамках нашей задачи заслуживают исследования, сравнивающие актуальные для рассматриваемого сценария методы доступа, например [12, 13]. В данных источниках авторами было показано, что стандартный TDLS обеспечивает самую высокую скорость передачи данных. Кроме того, в статье [14] изучалось использование метода доступа из технологии TDLS и кэширования с целью увеличения скорости передачи данных, и было показано, что метод доступа из технологии TDLS также положительно влияет на скорость.

Wi-Fi Direct часто рассматривается как основополагающая технология при разработке беспроводных сетей, содержащих большое число равноправных устройств, обменивающихся данными друг с другом. Например, в работе [15] разрабатывается архитектура для построения локальной сети обмена медиафайлами. Авторы показали, что отказ от централизованной сети и поддержка временных одноранговых соединений позволяет в два раза повысить пропускную способность сети, значительно сократив число замираний передаваемых по сети видеобразований. Подобным образом в работе [16] предлагается организовывать устройства в кластеры для снижения нагрузки на точку доступа, а также сокращения задержки доставки и увеличения скорости передачи данных.

Таким образом, технологии TDLS и Wi-Fi Direct хорошо изучены, однако модификация метода из технологии TDLS (M-TDLS), предложенная в [4], пока не исследована. В данной работе впервые проведено сравнение произ-

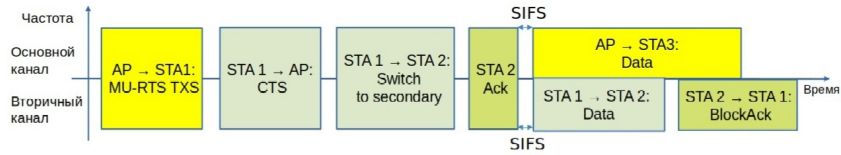


Рис. 1: Общая схема работы метода M-TDLS

водительности метода M-TDLS с методом доступа из технологии TDLS и методом доступа по умолчанию при обслуживании VR-трафика.

3 Рассматриваемый метод доступа к среде

Основной идеей рассматриваемого метода M-TDLS является предоставление точке доступа возможности отдавать на время передачи своих данных вторичный канал устройствам, работающим с использованием метода TDLS. Без ограничения общности, здесь и далее будем считать, что точка доступа и все станции используют канал шириной 40 МГц. В случае более широкого канала точка доступа предоставляет половину своих подканалов устройствам, работающим в режиме TDLS.

Рассмотрим общую схему работы этого метода подробнее, см. Рис. 1. Условимся, что в описании метода межкадровые интервалы равны короткому межкадровому интервалу SIFS, если не приводится другое значение. Пусть в сети точки доступа (англ.: Access Point, AP) находятся станции STA1, STA2 и STA3, причем станции STA1 и STA2 работают, используя метод TDLS. После окончания процедуры отсрочки точка доступа AP отправляет кадр MU-RTS TXS станции STA1, в котором сообщает станции STA1 о возможности перехода во вторичный канал при помощи метода M-TDLS. Затем точка доступа AP ожидает от станции STA1 кадр CTS. Станция STA1 получает кадр MU-RTS TXS и отправляет точке доступа AP кадр CTS, который информирует точку доступа AP о готовности станции STA1 перейти в её вторичный канал. Спустя SIFS после окончания передачи CTS, станция STA1 отправляет кадр STS (англ.: Switch To Secondary) станции STA2, с которой она желает перейти во вторичный канал точки доступа, и ожидает получения кадра ACK от станции STA2. После получения станцией STA1 кадра ACK от станции STA2, точка доступа AP до конца времени передачи своих данных использует для обмена данными только свой основной канал (например, для обмена данными со станцией STA3), а станции STA1 и STA2 используют вторичный канал точки доступа AP. После окончания времени передачи данных точки доступа AP все устройства начинают вновь использовать для процедуры отсрочки основной канал.

В случае, если станция STA1 в течение AckTimeout не получает подтверждение от станции STA2 на кадр STS, станция STA1 отправляет точке

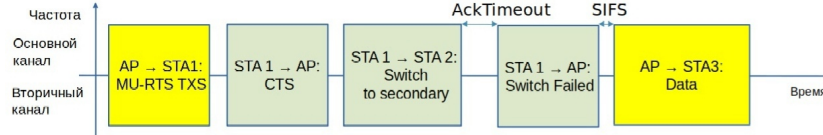


Рис. 2: Схема работы метода M-TDLS в случае отсутствия подтверждения кадра STS

доступа AP кадр SF (англ.: Switch Failed), см. Рис. 2. После получения кадра SF точка доступа AP использует для передачи и основной, и вторичный каналы.

Стоит заметить, что мощность сигнала каждого устройства фиксирована и, так как в методе M-TDLS два устройства одновременно будут передавать в канале меньшей ширины, то использование метода M-TDLS позволяет выбирать более высокую сигнально-кодую конструкцию (СКК) по сравнению со случаем, когда только одно устройство передает в канале большей ширины. Кроме того, передача во вторичном канале точки доступа позволяет станциям, использующим TDLS, избежать конкуренции за канал, благодаря чему метод M-TDLS уменьшает задержку передачи кадров.

4 Описание сценария

Рассматривается сценарий, в котором точка доступа соединена проводным каналом с HTTP-сервером, расположенным в Интернете. В сети точки доступа находятся ноутбук, VR-гарнитура и станция, генерирующая HTTP-запросы (HTTP-клиент). На ноутбуке установлено VR-приложение, посылающее видеопоток на VR-гарнитуру для формирования изображения виртуальной реальности. HTTP-клиент загружает файлы с HTTP-сервера.

В сценарии точка доступа находится в центре окружности радиуса R , см. Рис. 3. HTTP-клиент, ноутбук и VR-гарнитура расположены на окружности таким образом, что расстояние между двумя последними равно радиусу окружности R .

Рассматриваемый сценарий был реализован в среде имитационного моделирования NS-3. Все устройства изначально находились в канале шириной 40 МГц в полосе 5 ГГц. В ходе эксперимента все устройства выбирали наибольшую СКК, которую можно использовать при используемой мощности передачи и ширине полосы.

Модель распространения сигнала [17] в канале задавалась формулой

$$PL(d) = \begin{cases} 40.05 + 20 \cdot \lg(f_c/2.4) + 20 \cdot \lg(5) + 35 \cdot \lg(d/5), & \text{если } d > 5; \\ 40.05 + 20 \cdot \lg(f_c/2.4) + 20 \cdot \lg(d), & \text{если } d \leq 5. \end{cases}$$

где d — расстояние между приёмником и передатчиком в метрах, f_c — центральная частота в ГГц.

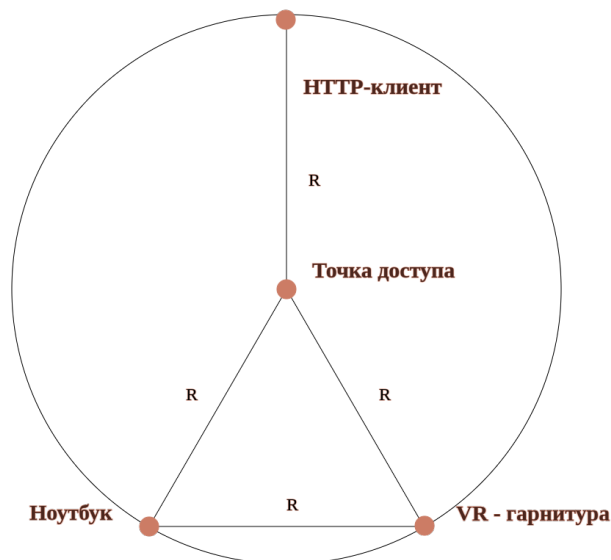


Рис. 3: Рассматриваемый сценарий

Длительность эксперимента составляла 200 с, причем в течение первых 20 с все станции подключались к точке доступа, а также передавали тестовые пакеты. После этого запускались VR- и HTTP-приложения. VR-приложение работало до конца эксперимента, данные передавались при помощи протокола UDP, средний битрейт видеопотока VR-приложения составлял 20 Мбит/с. Основной характеристикой качества обслуживания VR-трафика являлась доля потерянных кадров, причём кадр считался потерянным, если он не был полностью доставлен за 15 мс. Отметим, что при потерях больше 1% качество обслуживания VR-трафика считается неудовлетворительным [18].

HTTP-приложение запускалось через 5 с после начала работы VR-приложения и запрашивало файлы размером 200 Мбайт, причем время между последовательными запросами имеет усеченное экспоненциальное распределение со средним 30 с, минимумом 10 с и максимумом 60 с. Данные HTTP-приложения передавались при помощи протокола TCP. Основной характеристикой качества обслуживания HTTP-трафика являлась средняя скорость загрузки файлов.

В данной работе проводится сравнение трёх методов доступа к каналу: метод доступа по умолчанию с передачей видеопотока VR через точку доступа (в дальнейшем обозначен как «без TDLS»), метод TDLS¹ из стандар-

¹ В рамках рассматриваемого сценария методы доступа из технологий TDLS и Wi-Fi Direct будут действовать аналогично.

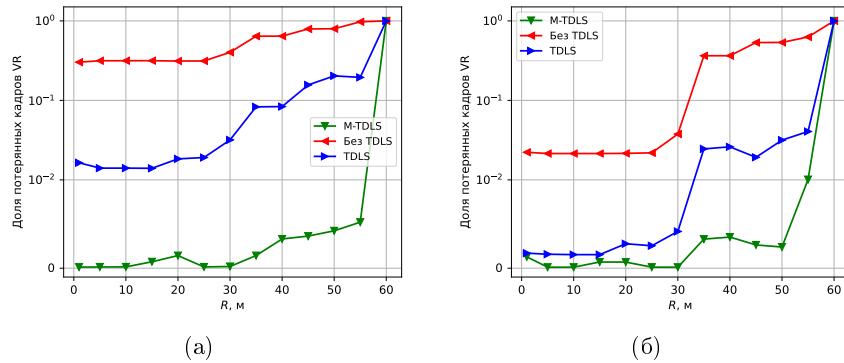


Рис. 4: Зависимость доли потерянных кадров VR-приложения от расстояния между устройствами при одной (а) и двух (б) антеннах.

та IEEE 802.11z («TDLS») и рассматриваемый метод M-TDLS («M-TDLS»). Отметим, что метод M-TDLS был реализован в среде NS-3 в ходе работы над данной статьей.

5 Численные результаты

Исследовались случаи, когда все устройства имеют одну и две антенны. Для каждого из них измерялись зависимости средней скорости загрузки файлов по протоколу HTTP и доли потерянных кадров VR-приложения в зависимости от расстояния. Результаты моделирования приведены на Рис. 4 и 5.

Из Рис. 4 видно, что метод M-TDLS обеспечивает наименьшую долю потерянных кадров VR-приложения в обоих случаях. Это связано с тем, что точка доступа дополнительно предоставляет ноутбуку и VR-гарнитуре вторичный канал во время своей передачи, тем самым сокращая задержку, связанную с конкуренцией в канале. Учитывая, что допустимая доля потерянных кадров для VR-приложений составляет 1%, можно заметить, что в случае одной антенны только метод M-TDLS обеспечивает выполнение требований VR-трафика к качеству обслуживания.

В случае использования двух антенн скорость передачи увеличивается вследствие увеличения числа пространственных потоков. Возникает ситуация, когда устройства используют максимально возможную СКК уже при передаче в канале шириной 40 МГц. Таким образом, при переключении в каналы шириной 20 МГц при использовании метода M-TDLS дальнейшего увеличения СКК не происходит, и наблюдаются схожие результаты для методов доступа TDLS и M-TDLS на Рис 4 (б) при расстояниях менее 30 м. Однако при увеличении расстояния на том же графике можно заметить, что только метод M-TDLS позволяет обеспечить допустимую долю потерянных кадров

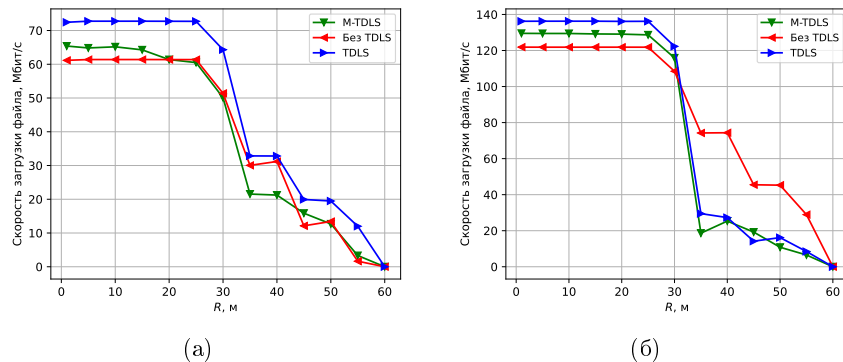


Рис. 5: Зависимость средней скорости скачивания файлов по протоколу HTTP от расстояния между устройствами при одной (а) и двух (б) антеннах.

VR-приложения, что объясняется повышением СКК в методе M-TDLS по сравнению с передачами, использующими TDLS и метод доступа по умолчанию. Кроме того, во всех трёх методах доступа доля потерянных кадров достигает единицы при приближении расстояния между устройствами к 60 м. Это связано с тем, что мощность принимаемого сигнала оказывается недостаточной для успешного декодирования полученных пакетов даже на минимальной СКК.

Перейдем к сравнению зависимости средней скорости скачивания файлов по протоколу HTTP от расстояния. Можно заметить, что в случае использования одной антенны метод TDLS показывает наилучшие результаты. Однако, несмотря на то, что точка доступа проводит передачу только в основном канале и это негативно сказывается на средней скорости загрузки файлов по протоколу HTTP, метод M-TDLS при расстояниях менее 20 м занимает промежуточное положение между TDLS и передачей через точку доступа без использования TDLS. Это связано с тем, что при использовании метода M-TDLS передача проходит на более высокой СКК, что позволяет обеспечить высокую скорость передачи HTTP-трафика. В случае использования двух антенн метод M-TDLS обеспечивает практически такие же значения средней скорости загрузки файлов по протоколу HTTP во всем диапазоне значений, как и метод TDLS, при этом заметно снижая долю потерянных кадров VR-приложения, особенно в области расстояний более 30 м.

6 Заключение

В данной работе был впервые реализован новый метод доступа к каналу M-TDLS в среде имитационного моделирования NS-3. При помощи разрабо-

танной модели был проведен анализ влияния этого метода на долю потерянных кадров VR-приложения и среднюю скорость загрузки HTTP-трафика. Было показано, что M-TDLS заметно улучшает обслуживание VR-трафика, не ухудшая обслуживание фоновых трафика, в случае, когда СКК, используемая в широком канале точки доступа, далека от максимальной.

Список литературы

1. Guan Huifang, Xu Yan, Zhao Dexi. Application of Virtual Reality Technology in Clinical Practice, Teaching, and Research in Complementary and Alternative Medicine // Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. — 2022. — Vol. 2022.
2. Virtual Reality (VR) in Medicine: A Systematic Review of Current Applications of VR and Potential Applications to Pediatric Orthopaedic Surgery / Koshinski Jessica, Chaclas Nathan, Suk Michael, and Seeley Mark // Journal of Orthopaedic Experience & Innovation. — 2022. — P. 34673.
3. Marks Benjy, Thomas Jacqueline. Adoption of virtual reality technology in higher education: An evaluation of five teaching semesters in a purpose-designed laboratory // Education and information technologies. — 2022. — Vol. 27, no. 1. — P. 1287–1305.
4. Channel Switching during a Shared TXOP. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/22/11-22-0123-00-00be-Channel-Switching-during-a-Shared-TXOP.pptx>.
5. Network Simulator 3 (NS-3). — Access mode: <https://www.nsnam.org/>.
6. Alliance Wi-Fi. Wi-Fi CERTIFIED™ TDLS: Easy-to-use, security-protected direct links to improve performance of Wi-Fi® devices // WI-Fi Alliance. — 2012.
7. Versteeg Sébastiaan, de Ruiter Joeri, Poll Erik. Inferring state machines of Tunneled Direct-Link Setup. — 2019.
8. Vanhoef Mathy, Piessens Frank. Release the Kraken: new KRACKs in the 802.11 Standard // Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. — 2018. — P. 299–314.
9. Alliance Wi-Fi. Wi-fi certified wi-fi direct // White paper. — 2010.
10. Camps-Mur Daniel, Garcia-Saavedra Andres, Serrano Pablo. Device-to-device communications with Wi-Fi Direct: overview and experimentation // IEEE wireless communications. — 2013. — Vol. 20, no. 3. — P. 96–104.
11. Optimized group owner selection in WiFi direct networks / Jahed Karim, Farhat Omar, Al-Jurdi G, and Sharafeddine Sanaa // 2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) / IEEE. — 2016. — P. 1–5.
12. da Silva Joaquim Magalhães Esteves. Simulation of algorithms for mobile ad-hoc networks. — 2015.
13. Benchmarking wireless protocols for feasibility in supporting crowdsourced mobile computing / Rodrigues João, Silva Joaquim, Martins Rolando, Lopes Luís, Drolia Utsav, Narasimhan Priya, and Silva Fernando // IFIP International Conference on Distributed Applications and Interoperable Systems / Springer. — 2016. — P. 96–108.
14. Jo Chanki. Cooperative Caching System for High Density Client Environment in TDLS Supported IEEE 802.11 WLAN Networks : Ph. D. thesis ; Seoul National University. — 2015.

15. Yoon Hayoung, Kim Jongwon. Collaborative streaming-based media content sharing in WiFi-enabled home networks // IEEE Transactions on Consumer Electronics. — 2010. — Vol. 56, no. 4. — P. 2193-2200.
16. Using edge-clouds to reduce load on traditional wifi infrastructures and improve quality of experience / Silva Pedro M Pinto, Rodrigues Joao, Silva Joaquim, Martins Rolando, Lopes Luís, and Silva Fernando // 2017 IEEE 1st International Conference on Fog and Edge Computing (ICFEC) / IEEE. — 2017. — P. 61-67.
17. Merlin Simone. TGax Simulation Scenarios. — Nov . — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0980-16-00ax-simulation-scenarios.docx>.
18. White Paper for 5G Cloud VR Service Experience Standards, Huawei. — 2019. — Access mode: <https://carrier.huawei.com/~media/CNBGV2/download/products/servies/White-Paper-for-5G-Cloud-VR-Service-Experience-Standards.pdf>.

Прототип облачного классификатора трафика для повышения качества обслуживания*

А.А. Курапов^{1,2}, Д.Р. Шамсимухаметов¹, М.В. Любогощев¹

{kurapov, shamsimukhametov, liubogoshchev}@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

² Московский физико-технический институт (НИУ)

Аннотация Классификация трафика — важная часть многих фреймворков, обеспечивающих качество обслуживания (англ.: Quality of Service, QoS). Однако, большая часть современного сетевого трафика передается в зашифрованном виде, и значительная точность классификации может быть достигнута только за счет применения сложных и постоянно обновляемых алгоритмов. При этом, многие домашние и офисные точки доступа Wi-Fi ограничены в вычислительных ресурсах, а их владельцы крайне редко обновляют программное обеспечение. В данной работе в качестве решения этой проблемы предлагается новый подход — классификация трафика как сервис. Основная идея заключается в том, чтобы отправлять несколько первых пакетов потока, не содержащих конфиденциальной информации пользователя, на облачный сервер, который их классифицирует и предлагает точке доступа подходящую политику обслуживания. В работе продемонстрировано, что представленный концепт может удвоить битрейт видеотрафика, сгенерированного сервисом YouTube, в загруженной сети.

1 Введение

Существует множество подходов, разработанных для обеспечения различных требований к качеству обслуживания гетерогенного трафика в сетях Wi-Fi [1–4]. Однако, все такие подходы требуют знания типа каждого потока и его QoS-параметров, то есть требуют классификации трафика [5–8].

Из литературы известно множество различных методов классификации трафика, обладающих своими преимуществами и недостатками. На точках доступа и коммутаторах зачастую реализуются классические методы, основанные на анализе небольшого числа параметров (портов, полезной нагрузки и так далее) [9]. Такие алгоритмы широко распространены, так как имеют низкие требования к вычислительным ресурсам оборудования. Однако в настоящее время они считаются ненадежными в связи с распространением шифрованного трафика и применением динамических портов [10–12]. Для достижения высокой точности классификации современного трафика

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10431, <https://rscf.ru/project/21-79-10431/>.

применяются более сложные методы. Они используют нейросетевые алгоритмы, принимающие на вход большое число параметров сетевых потоков трафика [13–15]. Чтобы не исчерпать вычислительные ресурсы точек доступа, классификация трафика нейросетевыми алгоритмами реализуется на других устройствах, осуществляющих мониторинг трафика сети [16, 17].

Такой подход с централизованным модулем классификации применим в магистральных сетях, но не может быть широко использован в сетях домашних и офисных, так как требует дорогостоящего оборудования и настройки модуля для каждой отдельной сети. Более того, такой подход приводит к дополнительным накладным расходам на пересылку параметров трафика на модуль классификации. Данные расходы компенсируются обеспечением качества обслуживания в магистральных сетях. Однако, в небольших сетях этот подход не исследовался, и его применение может привести к снижению эффективности работы таких сетей.

Кроме того, сетевой трафик постоянно меняется. Следовательно, алгоритмы классификации трафика необходимо периодически дообучать новым паттернам приложений и сервисов [18, 19], но владельцы домашних и офисных сетей редко обновляют их программное обеспечение. Таким образом, необходимы решения, позволяющие разгрузить домашние и офисные сети Wi-Fi от сложных вычислений, гарантировать им своевременное обновление, при этом в сети не должно применяться дополнительное дорогостоящее оборудование. Наконец, необходимо валидировать решение — исследовать, действительно ли оно повышает качество обслуживания с учетом дополнительных накладных расходов.

В данной статье предлагается новый подход к классификации трафика — «классификация трафика как сервис» (англ., TC as a service, TCaaS). продемонстрировано, как реализовать решение для домашних и офисных сетей с помощью TCaaS. Показано, что точки доступа оставляют задачи классификации облачному серверу, предоставляя ему только неконфиденциальные данные. В рамках подхода TCaaS был реализован прототип CloudETC. Он запускает современный алгоритм классификации трафика на облачном сервере и передает точке доступа Wi-Fi типы и требования к качеству обслуживания различных потоков. В данной работе был применен прототип CloudETC, чтобы показать, как TCaaS помогает улучшить качество обслуживания для мультимедийных приложений.

2 Обзор современных подходов к классификации трафика

Несмотря на то, что задача классификации трафика подробно исследована в литературе, она по-прежнему трудно осуществима на практике в домашних сетях Wi-Fi. Во-первых, несмотря на то что в заголовках пакетов IPv4 содержится поле DiffServ Code Point (DSCP), многие промежуточные узлы могут менять его в соответствии с политикой обслуживания их операторов [9], что делает данное поле ненадежным индикатором типа трафика. Во-вторых, традиционные методы, основанные на анализе портов, устарели

в связи с широким использованием динамических, случайных и нестандартных портов [12]. В-третьих, современный трафик, как правило, шифруется с помощью протокола Transport Layer Security (TLS) [10, 11]. Поэтому полезная нагрузка уровня приложения скрыта от алгоритмов классификации. Тем не менее многие современные алгоритмы классификации используют следующую уязвимость протокола TLS: TLS-соединение начинается с рукопожатия, в котором передается поле Server Name Indication (SNI) [15, 20, 21]. В этом поле содержится в незашифрованном виде доменное имя сервера, по которому можно определить тип передаваемых данных. Однако, в последнем обновлении протокола TLS данная уязвимость была устранена [22]. В-четвертых, для обеспечения качества обслуживания необходимо минимизировать задержку от получения первого пакета до определения типа потока. Поэтому статистические методы, основанные на анализе длин пакетов и интервалами между приходами пакетов [23, 24] неэффективны, так как требуют большого числа пакетов потока для достижения высокой точности классификации, что приводит к большому задержке классификации.

В последние годы, были разработаны несколько методов классификации трафика, удовлетворяющих перечисленным требованиям [13–15]. Они основаны на применении алгоритмов машинного обучения, которые анализируют полезную нагрузку первых нескольких пакетов потоков. Данные алгоритмы с высокой точностью классифицируют трафик, зашифрованный протоколом TLS, даже со скрытым полем SNI.

На практике классификация трафика в офисных и домашних сетях реализуется с помощью двух подходов. Во-первых, она может осуществляться на пограничном шлюзе или следующим за ним коммутаторе [25, 26]. При таком подходе либо используются простые ненадежные методы классификации (например, основанные на анализе портов или значений поля DSCP), либо применяется дорогостоящее оборудование для анализа большего числа параметров. Во-вторых, классификация трафика может быть вынесена на отдельное устройство (например, SDN-контроллер) [16, 17]. Данный подход позволяет использовать надежные классификаторы трафика, основанные на нейросетевых алгоритмах, а также разгрузить вычислительные ресурсы домашних и офисных точек доступа.

Однако, для небольших домашних и офисных сетей нецелесообразно настраивать и использовать дополнительные дорогостоящие устройства (такие, как SDN-контроллер), осуществляющие классификацию трафика. Таким образом, актуальной задачей является разработка прототипа надежной классификации трафика и обеспечения качества обслуживания в домашних и офисных сетях, не требующего установки и настройки дополнительных устройств в сети, а также исследование качества пользовательского восприятия при его использовании.

3 Постановка задачи

Главной целью данной работы является демонстрация состоятельности подхода «классификация трафика как сервис». Для этого необходимо разработать прототип облачного классификатора трафика, показать, что к нему

может быть подключена домашняя точка доступа с низкими вычислительными ресурсами доступа и продемонстрировать, что применение классификации трафика на точке доступа повышает качество обслуживания.

4 Предложенная схема работы облачного сервиса классификации трафика CloudETS

Облачный сервис классификации трафика CloudETS представляет собой сеть серверов, на которых работают алгоритмы классификации трафика, и доступ к которым осуществляется *через глобальную сеть*. CloudETS предоставляет услуги по классификации трафика точкам доступа. Чтобы подключиться к облачному сервису CloudETS на точке доступа должно быть установлено специальное приложение, которое запускает *CloudETS-агента*, устанавливающего соединение с *CloudETS-сервером* (см. рис. 1).

4.1 CloudETS-агент

CloudETS-агент — программное обеспечение, работающее на точке доступа. Точка доступа предоставляет CloudETS-агенту права на чтение и изменение трафика, проходящего через нее. CloudETS-агент выполняет три функции.

- *Установка соединения с CloudETS-сервером*. В первую очередь агент CloudETS устанавливает безопасное соединение с CloudETS-сервером. Далее агент отправляет серверу информацию о том, на какие категории осуществлять классификацию трафика. В ответ на это сервер отправляет агенту требуемое число первых пакетов каждого потока, которое агент должен пакету пересылать. После того как эта информация согласована, между агентом и сервером начинается обмен данными.
- *Обмен данными с CloudETS-сервером*. Агент и сервер обмениваются двумя типами сообщений. Как только на точку доступа поступает новый сетевой поток, агент перенаправляет на сервер согласованное число первых пакетов этого потока. В ответ на это сервер отправляет сообщение, содержащее информацию о результате классификации указанного потока.
- *Назначение категории обслуживания*. Результатом классификации является метка категории обслуживания потока, другими словами, его QoS-класс. CloudETS-агент отправляет команду точке доступа обслуживать поток согласно значению QoS-класса, полученного от CloudETS-сервера.

4.2 CloudETS-сервер

К CloudETS-серверу может быть подключено множество CloudETS-агентов. CloudETS-сервера выполняют две функции: непосредственно определение категории обслуживания потока, и отправка результатов классификации потока соответствующему агенту. Для определения категории обслуживания трафика на CloudETS-серверах работают алгоритмы классификации трафика, обученные назначать различные QoS-классы в зависимости от требований CloudETS-агентов.

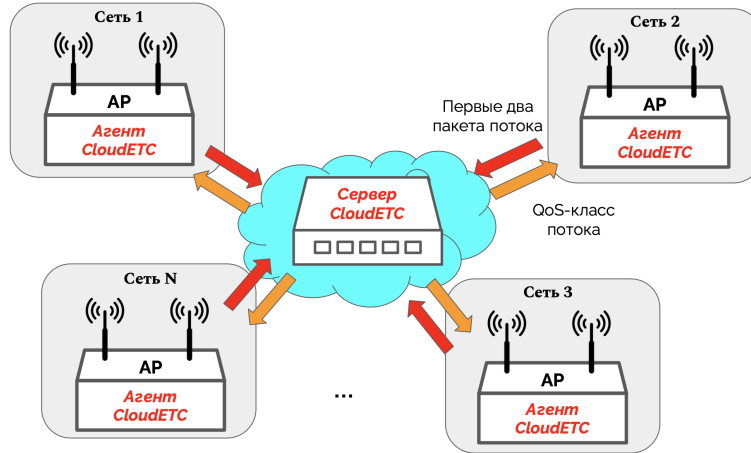


Рис. 1: Схема работы облачного сервиса классификации трафика CloudETC

5 Описание эксперимента

5.1 Реализация прототипа CloudETC

В данной работе предлагается прототип CloudETC с одним агентом CloudETC, работающим на модифицированной точке доступа *MikrotikhAP ac*. На точке доступа работает механизм Enhanced distributed channel access (EDCA). Данный механизм позволяет задать трафику разных категорий разные параметры доступа к каналу, таким образом понизив или повысив его приоритет. В частности, при использовании EDCA кадры видеотрафика (категория Video) имеют большую вероятность отправки, чем кадры веб-трафика (категория Best Effort).

В качестве CloudETC-сервера выступает ноутбук Lenovo, находящийся в другой локальной сети. Сервер CloudETC запускает алгоритм АВ-RF, описанный в статье [15], который позволяет с высокой точностью и скоростью классифицировать трафик. Алгоритм обучен классифицировать YouTube потоки на базе данных из работы [27] по первым двум стартовым пакетам потока. Результатом классификации АВ-RF является категория обслуживания: *Video* для видеопотоков YouTube, *Best Effort* для остальных. CloudETC-агент пересылает два первых пакета потока на CloudETC-сервер. Получая сообщение о категории обслуживания, CloudETC-агент назначает тип обслуживания соответствующему потоку.

5.2 Параметры эксперимента

В данной работе развертывается сеть Wi-Fi с тремя ноутбуками и пятью смартфонами, называемыми далее станциями. Все станции подключены к одной точке доступа (*MikrotikhAP ac*), работающей в диапазоне 2,4 ГГц и

Таблица 1: Параметры прототипа CloudETC.

Параметр	Значение
Число CloudETC-агентов	1
Число пересылаемых CloudETC-агентом первых пакетов потока	2
Точка доступа с CloudETC-агентом	<i>MikrotikhAP ac</i>
CloudETC-сервер	Lenovo
Механизм обеспечения QoS	EDCA
Категории трафика	<i>Video, Best Effort</i>
Алгоритм классификации трафика	AB-RF

использующей канал шириной 20 МГц. В эксперименте проводится серия запусков, работающих следующим образом. В начале каждого запуска эксперимента станция STA₀ начинает загружать видео с сервиса YouTube. В то время как остальные станции, далее будем называть их интерферирующими, загружают файлы на сервер WebDAV (Web Distributed Authoring and Versioning), расположенный за AP, и скачивают с него же другие файлы. Размеры файлов превышают 20 Гб, скачивание и загрузка происходят непрерывно, поэтому можно считать, что сеть работает в режиме насыщения. В различных запусках эксперимента варьируется число интерферирующих станций от 0 до 7, и оценивается качество обслуживания для видеопотоков YouTube в каждом из них. Длительность одного запуска эксперимента 180 секунд. Усреднение производится по 5 запускам эксперимента в каждом сценарии для каждого числа интерферирующих станций.

Таблица 2: Параметры эксперимента.

Параметр	Значение
Частотный диапазон	2,4 ГГц
Ширина канала	20 МГц
Длительность одного запуска эксперимента	180 сек.
Число запусков эксперимента	5
Число станций, загружающих YouTube	1
Число станций, скачивающих файлы с WebDav	0-7

5.3 Сценарии эксперимента

Результаты запуска сравниваются в двух сценариях работы точки доступа.

- **Сценарий «BestEffort».** Точка доступа не пользуется сервисом классификации трафика и не подключена к CloudETC-серверу, все потоки на ней обслуживаются механизмом EDCA, как Best Effort.
- **Сценарий «CloudETC».** Точка доступа пользуется облачным сервисом классификации трафика, на ней работает CloudETC-агент, подключенный к CloudETC-серверу, благодаря которому видеопотоки YouTube обслуживаются механизмом EDCA как видеопотоки.

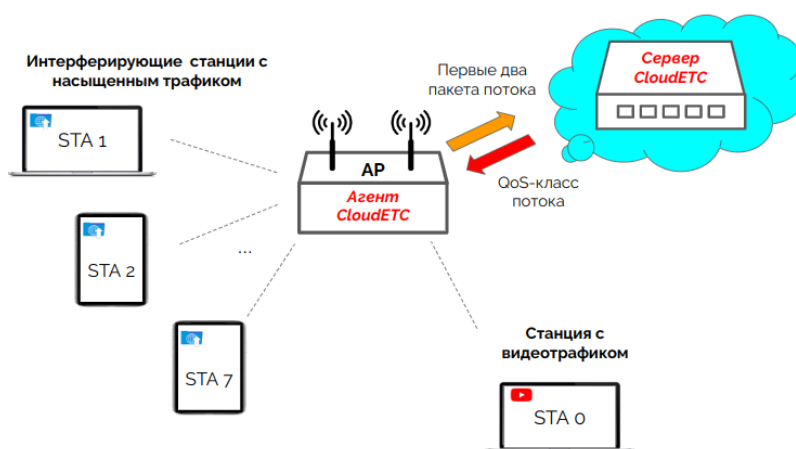


Рис. 2: Сценарий эксперимента с включенным CloudETC

6 Метрики

Сервис YouTube использует широко распространенный в интернете протокол прикладного уровня Hypertext Transfer Protocol (HTTP). Для получения сегментов видео клиент отправляет серверу специальные сообщения протокола HTTP, называемые GET-запросами. Данные запросы содержат длину запрашиваемого видео в байтах и его длительность в секундах. Таким образом, анализ GET-запросов позволяет измерить битрейт воспроизводимого сегмента, как отношение длины видео к его длительности. Усреднение битрейта по сегментам даст *средний битрейт* видео, который является часто используемой метрикой качества обслуживания видеопотоков [28].

Однако данной метрики недостаточно для корректного сравнения качества обслуживания видеопотоков, так как они могут иметь одинаковый

средний битрейт, но при этом разные начальную задержку и продолжительность прерываний воспроизведения. Поэтому в данной работе для исследования качества обслуживания видео в качестве второй метрики используется сумма данных величин — *общая длительность пауз воспроизведения*.

7 Результаты

На рис. 3 показано, как средний битрейт видео зависит от числа интерферирующих станций. Благодаря классификации трафика точка доступа AP выделяет видеотрафику больший приоритет доступа к каналу, и его средний битрейт увеличивается до 2,3 раз. В некоторых конфигурациях, например, для одной интерферирующей станции, выигрыш в среднем битрейте небольшой, потому что сервис YouTube имеет дискретный набор возможных битрейтов, и оба рассматриваемых решения не могут предоставить достаточную емкость канала для переключения на больший битрейт. За счет того, что результаты битрейта получены с помощью анализа GET-запросов, они не имеют погрешности измерения и имеют незначительную статистическую погрешность.

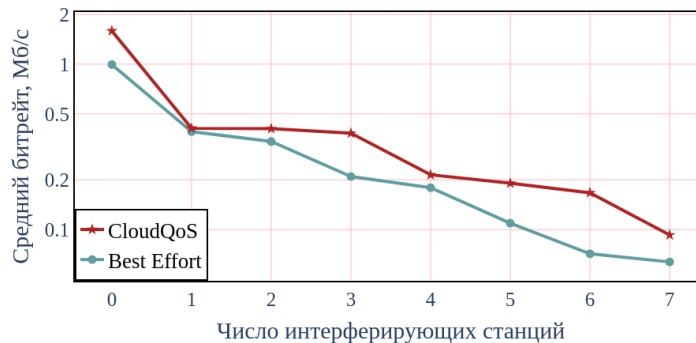


Рис. 3: Средний битрейт видеотрафика YouTube.

На рис. 4 приведены результаты длительности пауз воспроизведения (сумма исходного времени буферизации и длительность последующих прерываний воспроизведения). График показывает, что CloudETS позволяет сократить время, в которое видео не воспроизводится до 2 раз за счет более стабильного выделения ресурсов. Локальные немонотонности кривых на графике обусловлены уменьшением битрейта и, как следствие, сокращением исходного времени буферизации. При пяти запусках эксперимента результаты длительности пауз имеют отклонение от среднего значения не более двух секунд.

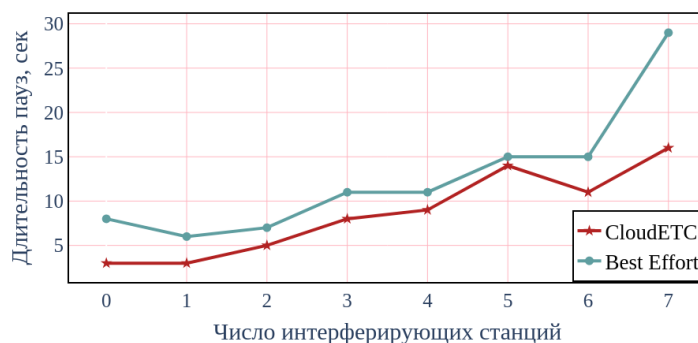


Рис. 4: Длительность пауз воспроизведения

8 Заключение

В данной статье был разработан прототип CloudETC, позволяющий улучшить качество обслуживания домашних и офисных сетей Wi-Fi за счет классификации шифрованного трафика без нарушения конфиденциальности пользователей. Данный прототип может улучшить средний битрейт видеопотоков, загружаемых с сервиса YouTube, до 2,3 раз и сократить длительность пауз воспроизведения, до 2 раз. В будущем планируется протестировать разработанный прототип на большем разнообразии категорий трафика (телефония, трафик игр в режиме реального времени, веб-трафик, просмотр веб-страниц, транслирование видеотрафика и т.д.) Кроме того, планируется разработать приложение CloudETC для точки доступа, которое будет поддерживаться точками доступа различных вендеров.

Список литературы

1. Huang Ching-Ling, Liao Wanjiun. Throughput and delay performance of IEEE 802.11 e enhanced distributed channel access (EDCA) under saturation condition // IEEE Transactions on wireless communications. — 2007. — Vol. 6, no. 1. — P. 136–145.
2. IEEE 802.11 ax uplink scheduler to minimize delay: A classic problem with new constraints / Bankov Dmitry, Didenko Andre, Khorov Evgeny, Loginov Vyacheslav, and Lyakhov Andrey // 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) / IEEE. — 2017. — P. 1–5.
3. Dutt Sushil, Ahmad Iftikhar, Habibi Daryoush. A novel optimized scheduler to provide qos for video ip telephony over wireless networks // 2011 IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications / IEEE. — 2011. — P. 455–461.

4. Proportional-based resource allocation control with QoS adaptation for IEEE 802.11 ax / Filoso David Gonzalez, Kubo Ryogo, Hara Kazutaka, Tamaki Shinya, Minami Katsuya, and Tsuji Kohji // ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC) / IEEE. — 2020. — P. 1–6.
5. Rezaei Shahbaz, Liu Xin. Deep learning for encrypted traffic classification: An overview // IEEE communications magazine. — 2019. — Vol. 57, no. 5. — P. 76–81.
6. Towards the deployment of machine learning solutions in network traffic classification: A systematic survey / Pacheco Fannia, Exposito Ernesto, Gineste Mathieu, Baudoin Cedric, and Aguilar Jose // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2018. — Vol. 21, no. 2. — P. 1988–2014.
7. A review on machine learning-based approaches for Internet traffic classification / Salman Ola, Elhajj Imad H, Kayssi Ayman, and Chehab Ali // Annals of Telecommunications. — 2020. — Vol. 75, no. 11. — P. 673–710.
8. The rise of traffic classification in IoT networks: A survey / Tahaei Hamid, Afifi Firdaus, Asemi Adeleh, Zaki Faiz, and Anuar Nor Badrul // Journal of Network and Computer Applications. — 2020. — Vol. 154. — P. 102538.
9. On the utility of unregulated IP DiffServ Code Point (DSCP) usage by end systems / Barik Runa, Welzl Michael, Elmokashfi Ahmed, Dreibholz Thomas, Islam Safiqul, and Gjessing Stein // Performance Evaluation. — 2019. — Vol. 135. — P. 102036.
10. HTTPS encryption on the web. — Access mode: <https://transparencyreport.google.com/https/overview?hl=en>. (Accessed on 15/07/2022).
11. Let's Encrypt Stats. — Access mode: <https://letsencrypt.org/stats/>. (Accessed on 15/07/2022).
12. AlZoman Razan M., Alenazi Mohammed J. F. A Comparative Study of Traffic Classification Techniques for Smart City Networks // Sensors. — 2021. — Vol. 21, no. 14. — Access mode: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/14/4677>.
13. Attention-based bidirectional GRU networks for efficient HTTPS traffic classification / Liu Xun, You Junling, Wu Yulei, Li Tong, Li Liangxiang, Zhang Zheyuan, and Ge Jingguo // Information Sciences. — 2020. — Vol. 541. — P. 297–315.
14. MATEC: A lightweight neural network for online encrypted traffic classification / Cheng Jin, Wu Yulei, Yuepeng E, You Junling, Li Tong, Li Hui, and Ge Jingguo // Computer Networks. — 2021. — Vol. 199. — P. 108472.
15. Is Encrypted ClientHello a Challenge for Traffic Classification? / Shamsimukhametov D, Kurapov A, Liubogoshchev M, and Khorov E // IEEE Access. — 2022. — Vol. 7.
16. Ogasawara Shota, Takahashi Yutaka. Performance analysis of traffic classification in an OpenFlow switch // 2016 Cloudification of the Internet of Things (CIoT). — 2016. — P. 1–6.
17. Scalable architecture for SDN traffic classification / Hayes Matthew, Ng Bryan, Pekar Adrian, and Seah Winston KG // IEEE Systems Journal. — 2017. — Vol. 12, no. 4. — P. 3203–3214.
18. Coming of age: A longitudinal study of tls deployment / Kotzias Platon, Razaghpanah Abbas, Amann Johanna, Paterson Kenneth G, Vallina-Rodriguez Narseo, and Caballero Juan // Proceedings of the Internet Measurement Conference 2018. — 2018. — P. 415–428.
19. Studying TLS usage in Android apps / Razaghpanah Abbas, Niaki Arian Akhavan, Vallina-Rodriguez Narseo, Sundaresan Srikanth, Amann Johanna, and Gill Phillipa // Proceedings of the 13th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies. — 2017. — P. 350–362.

20. Rescorla Eric. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3. — RFC 8446. — 2018. — Aug. — (Accessed on 08/06/2021). Access mode: <https://tools.ietf.org/html/rfc8446>.
21. Transport Layer Security (TLS) Extensions: Extension Definitions : RFC : 6066 / RFC Editor, Wilmington, DE, USA ; executor: Eastlake D. : 2011. — January. — Access mode: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6066.txt>. — <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6066.txt>.
22. TLS Encrypted Client Hello : Internet-Draft : draft-ietf-tls-esni-14 / Internet Engineering Task Force ; executor: Rescorla Eric, Oku Kazuho, Sullivan Nick, Wood Christopher A. : 2022. — Feb. — 48 p. Access mode: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-ietf-tls-esni-14>. — Work in Progress.
23. Encrypted traffic classification based on Gaussian mixture models and Hidden Markov Models / Yao Zhongjiang, Ge Jingguo, Wu Yulei, Lin Xiaosheng, He Runkang, and Ma Yuxiang // Journal of Network and Computer Applications. — 2020. — Vol. 166. — P. 102711.
24. Chencheng Ma, Xuehui Du, Lifeng Cao. Improved KNN Algorithm for Fine-Grained Classification of Encrypted Network Flow. — 2020. — <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/2/324>. Access mode: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/2/324>.
25. Multimedia Data Flow Traffic Classification Using Intelligent Models Based on Traffic Patterns / Canovas Alejandro, Jimenez Jose Miguel, Romero Oscar, and Lloret Jaime // IEEE Network. — 2018. — Vol. 32, no. 6. — P. 100–107.
26. Hirvonen Matti, Laulajainen Jukka-Pekka. Two-phased network traffic classification method for quality of service management // 2009 IEEE 13th International Symposium on Consumer Electronics. — 2009. — P. 962–966.
27. Are Neural Networks the Best Way for Encrypted Traffic Classification? / Shamsimukhametov D, Liubogoshchev M, Khorov E, and Akyldiz IF // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T) / IEEE. — 2021. — P. 1–5.
28. Requet: Real-time qoe detection for encrypted youtube traffic / Gutterman Craig, Guo Katherine, Arora Sarthak, Wang Xiaoyang, Wu Les, Katz-Bassett Ethan, and Zussman Gil // Proceedings of the 10th ACM Multimedia Systems Conference. — 2019. — P. 48–59.

Исследование метода разрешения коллизий в сценариях сосуществования двух операторов NR-U в нескольких нелицензируемых каналах*

А.Ю. Троегубов^{1,2}, В.А. Логинов^{1,3}

troegubov@wireless.iitp.ru, loginov@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

³ Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики

Аннотация Одним из способов повышения пропускной способности сотовых сетей является использование многоканальных передач в нелицензируемой полосе частот. Методы доступа к нелицензируемому каналу в сетях NR-U (англ.: New Radio Unlicensed) основаны на механизме CSMA/CA (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), что неизбежно приводит к коллизиям в сети, особенно при одновременной работе нескольких операторов. В настоящей работе предлагается обобщение ранее предложенного метода разрешения коллизий для случая передач в нескольких каналах. На примере многоканального метода доступа Type B показано, что после обобщения метод разрешения коллизий сохраняет свою эффективность и обеспечивает прирост пропускной способности 17–33% в зависимости от сценария.

Ключевые слова: 5G, NR-U, разрешение коллизий, Listen Before Talk, многоканальный метод доступа

1 Введение

Одним из ключевых требований к сотовым сетям пятого поколения является обеспечение высокой пропускной способности. Технологией сотовой связи пятого поколения является технология NR (англ.: New Radio). Связанная с ней технология NR-U (англ.: New Radio Unlicensed) позволяет базовым станциям 5G (англ.: gNodeB, gNB) использовать нелицензируемые частоты для передачи данных, повышая тем самым емкость сети. Для доступа к каналу в нелицензируемой полосе 5 ГГц gNB используют метод LBT (Listen Before

* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

Talk), основанный на механизме CSMA/CA (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) и процедуре экспоненциальной отсрочки.

Многоканальные методы доступа позволяют gNB одновременно передавать данные сразу в нескольких нелицензируемых каналах, что заметно повышает пропускную способность сотовой сети [1, 2]. В спецификации [3] описаны два метода многоканального доступа, Type A и Type B, каждый из которых имеет еще две разновидности. При использовании метода Type A в каждом из каналов выполняется независимая процедура отсрочки, являющаяся частью метода LBT. В отличие от метода Type A, при использовании метода Type B gNB выбирает основной канал, и только в нем выполняет процедуру отсрочки согласно методу LBT, а остальные каналы, называемые вторичными, прослушиваются только перед началом передачи.

Ранее в работе [4] были исследованы сценарии сосуществования двух операторов NR-U при различном способе выбора основных каналов для метода Type B, а именно — его разновидности Type B1, описанной в разделе 2. Показано, что взаимное расположение основных каналов операторов NR-U сильно влияет на пропускную способность отдельного оператора. Также на производительность сети оказывают влияние коллизии, вызванные тем, что метод LBT основан на механизме CSMA/CA, и которых можно избежать при использовании метода разрешения коллизий.

В данной работе исследуется эффективность метода разрешения коллизий между базовыми станциями [5, 6] в сценариях сосуществования двух операторов NR-U в нескольких частотных каналах [4]. В частности, проведено обобщение указанного метода на случай многоканальных передач для метода Type B. Затем при помощи имитационного моделирования показано, что применение метода разрешения коллизий совместно с методом Type B позволяет повысить производительность сетей NR-U вне зависимости от способа выбора основного канала, а также взаимного расположения основных каналов разных операторов.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приведено описание метода доступа LBT, а также многоканального метода Type B. Обзор литературы по теме работы представлен в разделе 3. Раздел 4 содержит описание метода разрешения коллизий и его обобщения на случай передач в нескольких каналах. Моделируемые сценарии и анализ численных результатов приведены в разделе 5. Раздел 6 содержит заключение.

2 Метод доступа к каналу в сети NR-U

Для получения доступа к одному нелицензируемому каналу базовые станции NR-U (а также базовые станции LTE-LAA, технологии-предшественницы NR-U), используют метод LBT, устроенный следующим образом. Перед началом передачи gNB ждет, пока канал будет свободен непрерывно в течение интервала T_d , определяемого приоритетом трафика, см. табл. 1. Затем gNB случайным образом выбирает целое число из отрезка $[0, W - 1]$ в качестве

Таблица 1: Параметры метода доступа LBT в нисходящем канале

Приоритет трафика	T_d , мкс	W_{\min}	W_{\max}	МСОТ, мс
РС1	25	4	8	2
РС2	25	8	16	3
РС3	43	16	64	8
РС4	79	16	1024	8

начального значения счетчика отсрочки, где W — текущее значение конкурентного окна. Счетчик уменьшается на 1 каждый раз, когда канал свободен в течение $\sigma = 9$ мкс. Если канал становится занятым, то счетчик замораживается, и отсчет возобновляется, когда канал будет снова свободен в течение интервала T_d . gNB может начать передачу, когда счетчик отсрочки достигнет нуля.

Как и в лицензируемом канале, передача gNB в нелицензируемой полосе разбита на временные слоты, каждый из которых содержит по 14 OFDM-символов. Максимальная продолжительность непрерывного обмена данными между gNB и пользовательским устройством ограничена и задается значением МСОТ (англ.: maximum channel occupancy time), зависящим от приоритета трафика. При этом по умолчанию gNB может начать передачу только на границе временного слота, чтобы поддерживать синхронизацию с передачами в лицензируемом канале, имеющими слотированную структуру.

Изменение конкурентного окна основано на механизме HARQ-подтверждений (англ.: Hybrid Automatic Repeat Request Acknowledgement) [3]. Если доля отрицательных HARQ-подтверждений, относящихся к первым временным слотам в передаче, выше некоторого порога, то конкурентное окно удваивается, а в противном сбрасывается до W_{\min} . Максимальное значение конкурентного окна ограничено значением W_{\max} . Значения W_{\min} и W_{\max} также зависят от приоритета трафика.

В литературе обычно считается, что gNB посылает резервирующий сигнал [7–9], чтобы не дать другим устройствам занять канал в течение интервала времени между окончанием процедуры отсрочки и следующей границей временного слота. Помимо этого в технологии NR-U, в отличие от технологий LTE-LAA, базовая станция может использовать передачи в мини-слотах (англ. mini-slot transmissions), которые позволяют начать передачу на границе OFDM-символа внутри временного слота, сократив тем самым длительность резервирующего сигнала [9].

Для доступа к множеству каналов в спецификации определено два метода: Type A и Type B. Как и в [4], в данной работе предполагается, что gNB обоих операторов используют многоканальный метод Type B, работающий следующим образом, см. рис 1. Сначала из множества каналов, на которых gNB собирается передавать, она выбирает один канал, называемый основным каналом (англ. primary channel). В нем gNB выполняет процедуру отсрочки согласно методу LBT, описанному выше. gNB выби-

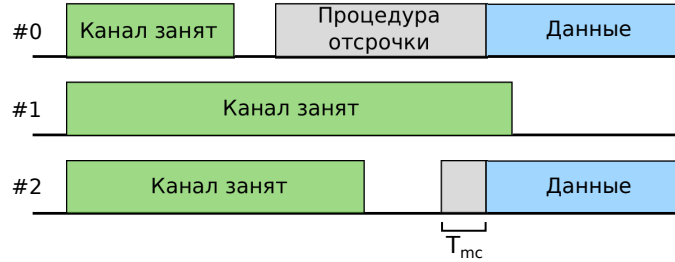


Рис. 1: Пример работы многоканального метода доступа Type B (канал 0 — основной)

рает основной канал либо случайно перед каждой передачей, либо любым другим способом (например, его можно зафиксировать), но тогда менять основной канал разрешено не чаще одного раза в секунду [3]. Остальные каналы называются вторичными (англ. secondary channel). После окончания процедуры отсрочки в основном канале gNB может задействовать для передачи также все вторичные каналы, которые были свободны в течение интервала $T_{mc} = 25$ мкс непосредственно перед началом передачи.

Метод Type B имеет две разновидности: Type B1 и Type B2. В методе Type B1 независимо от числа каналов используется одно значение конкурентного окна. В методе Type B2 для каждого канала gNB использует отдельное конкурентное окно, а при выборе значения счетчика отсрочки берется наибольшее из всех конкурентных окон.

3 Обзор литературы

Технологиям LTE-LAA и NR-U посвящено множество работ. Часть исследований рассматривает работу базовых станций только в одном канале [6, 8–11]. В работе [8] показано, что для улучшения производительности сетей LTE-LAA/NR-U при одновременной работе с устройствами других технологий в одном канале базовой станции лучше посылать резервирующий сигнал, а не просто ожидать начала временного слота. Также метод LBT без резервирующего сигнала может приводить к нечестному распределению канальных ресурсов между gNB в случае асинхронного отсчета временных слотов [10] и к заметному снижению пропускной способности сотовой сети при наличии устройств других технологий [7], работающих в том же канале. При этом использование передач в мини-слотах [9] позволяет уменьшить накладные расходы на резервирующий сигнал без снижения производительности сети NR-U.

В работах [6, 11] предложено несколько методов разрешения коллизий для gNB, применение которых заметно увеличивает пропускную способность сотовой сети. В частности, метод gCR-LBT [6] объединяет в себе преимущество передач в мини-слотах и схему разрешения коллизий [11], обес-

печивая наибольший прирост пропускной способности относительно метода LBT с резервирующим сигналом.

Ряд работ посвящен аналитическому моделированию работы сотовых сетей в нескольких каналах [12–14]. При этом в [12] рассматривается сценарий только с двумя каналами, а также не учтена слотированная структура передач базовых станций. В [14] авторы не учитывают эффект утечки мощности в соседние каналы и считают процедуры отсрочки в них полностью независимыми. Также во всех работах [12–14] рассматривается только один оператор LTE-LAA/NR-U.

Ряд работ [15–19] посвящен имитационному моделированию работы сетей LTE-LAA и NR-U. В [15, 16] считается, что все станции работают в одних и тех же частотных каналах и могут агрегировать любое их количество (вплоть до 32). В [17] предлагаются улучшения для многоканального метода Туре А в предположении, что все станции используют одни и те же каналы. В [18] предложен гибридный метод доступа к нескольким каналам, эффективность которого оценивается в сценариях с как минимум 8 каналами. В [19] исследуется влияние случайной интерференции в канале на задержки в сети NR-U при использовании двух частотных каналов. Более того, во всех работах [15–19] рассматривается сценарий работы только одного оператора NR-U.

Тем не менее в работах [1, 2], исследовавших сети LTE-LAA в городе Чикаго, было показано, что на практике базовые станции агрегируют не более трех соседних каналов, а разные мобильные операторы могут использовать одни и те же частотные каналы.

Далее сценарием работы оператора NR-U будем называть множество используемых им каналов и метод выбора основного канала. Ранее в [4] были рассмотрены все возможные сценарии сосуществования двух операторов NR-U в трех каналах, когда каждый оператор мог агрегировать два канала. При этом gNB использовали метод Туре В1 и LBT с резервирующим сигналом. Показано, что нормированная пропускная способность сильно зависит от взаимного расположения основных каналов операторов NR-U.

Исходя из вышесказанного, актуальной является задача обобщения механизма разрешения коллизий gCR-LBT [6] для многоканального метода доступа Туре В1 и оценки его эффективности в сценариях [4].

4 Обобщение метода разрешения коллизий

В отличие от [4], в данной работе после получения доступа к нелегальным каналам согласно методу Туре В1, gNB будут вместо посылки резервирующего сигнала использовать метод разрешения коллизий gCR-LBT. Основная идея данного метода для одного канала состоит в том, что gNB до начала передачи данных пытается разрешить коллизию в течение некоторого интервала времени, разделенного на слоты разрешения коллизий (РК-слоты). В каждом РК-слоте gNB может передавать резервирующий сигнал или прослушивать канал. За счет разного поведения базовых станций

в одном РК-слоте происходит разрешение коллизии. Подробнее про данный метод можно прочитать в [5, 6].

Важной особенностью многоканальных передач является утечка мощности в соседние каналы [16]. Из-за нее gNB не может корректно определить занятость канала, если она сама передает в соседнем канале. Поэтому поведение gNB в РК-слотах должно быть одинаковым во всех каналах при многоканальной передаче. Обобщение метода gCR-LBT состоит в следующем: если при прослушивании канала в течение РК-слота gNB обнаруживает, что он занят, то на данном канале gNB прекращает процедуру разрешения коллизии и не использует его для передачи данных. При этом при принятии решения об изменении конкурентного окна считается, что на этом канале произошла коллизия.

5 Численные результаты

В разделе 5.1 приводится описание моделируемых сценариев и используемой метрики производительности сети, а в разделе 5.2 проведен анализ полученных результатов.

5.1 Описание сценариев

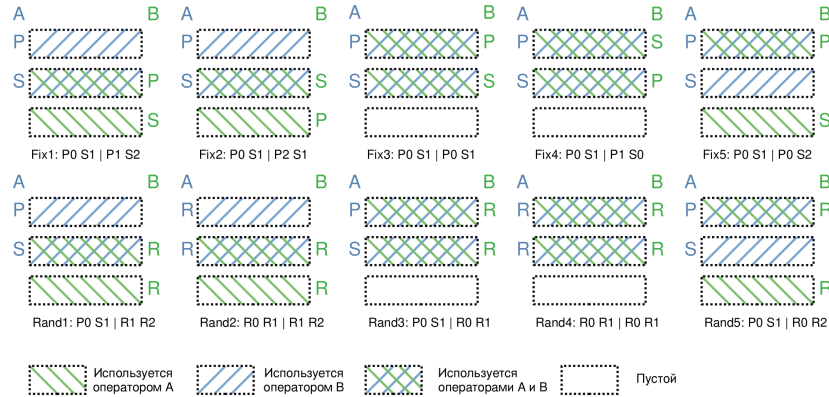


Рис. 2: Рассматриваемые сценарии работы операторов А и В [4]

Рассматривается сеть NR-U, в которой N_A gNB принадлежат оператору А, а N_B gNB — оператору В. Все gNB обоих операторов находятся в зоне радиовидимости друг друга и работают в режиме насыщения. Рассматриваются только передачи в нисходящем канале, и каждая gNB может

агрегировать два нелицензируемых канала из трех. При этом множество каналов, на которых может передавать gNB, и способ выбора основного канала одинаковы для gNB одного оператора, но могут различаться у разных операторов.

Как и в работе [4], рассматриваются два способа выбора основного канала. При фиксированном способе gNB один раз выбирает основной и вторичный каналы и далее их не меняет. При случайном способе gNB каждый раз в начале процедуры отсрочки случайным образом выбирает, какой из двух каналов будет основным. За счет способа выбора основного канала и взаимного расположения основных каналов операторов получается 10 различных сценариев, см. рис. 2.

Далее сценарии обозначаются как «name: XN XN | XN XN», где name — название сценария; $N \in \{0, 1, 2\}$ — номер канала; $X \in \{P, S, R\}$ — обозначение того, как используется канал: P — зафиксирован как основной, S — зафиксирован как вторичный, R — используется при случайном выборе основного канала. Сначала указываются каналы оператора А, а после черты «|» — каналы оператора В.

В качестве метрики производительности сети будем использовать нормированную пропускную способность [4]:

$$S_x = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} T_x^i}{T_{sim}}, \quad (1)$$

где S_x — нормированная пропускная способность оператора $x \in \{A, B\}$; T_x^i — суммарное время успешных передач данных всех gNB оператора x в канале i ; T_{sim} — время моделирования. Таким образом, для описанных ранее сценариев значение S_x лежит в интервале $[0, 2]$, так как gNB обоих операторов передают данные в двух каналах.

5.2 Анализ численных результатов

Для оценки нормированной пропускной способности сетей была разработана имитационная модель. При моделировании использовались значения параметров, соответствующие приоритету трафика РСЗ (см. табл. 1), длительность временного слота 500 мкс, с использованием передачи в мини-слотах; время моделирования $T_{sim} = 100$ с, результаты усредняются по пяти запускам модели.

На рис. 3 и рис. 4 приведены значения нормированной пропускной способности для сетей обоих операторов в различных сценариях при использовании метода gCR-LBT (Оператор А/В, gCR-LBT) или резервирующего сигнала (Оператор А/В, РС). Также в табл. 2 указана суммарная нормированная пропускная способность для рассматриваемых методов. Видно, что во всех сценариях при использовании метода gCR-LBT наблюдается прирост пропускной способности относительно метода LBT с РС как для отдельного оператора, так и для всей сети в целом.

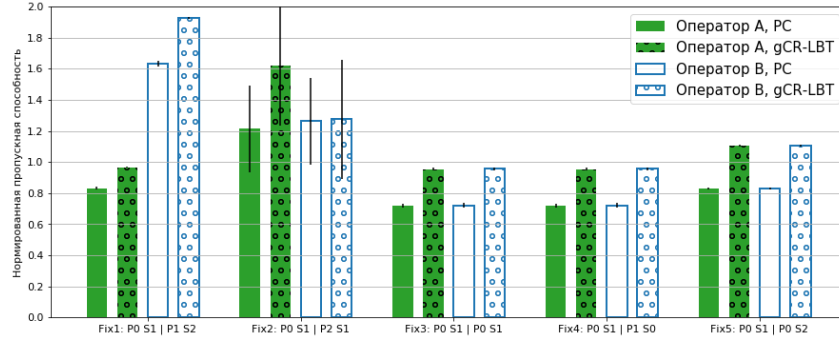


Рис. 3: Сравнение нормированной пропускной способности для обоих операторов при использовании LBT с PC и gCR-LBT, $N_A = N_B = 5$, фиксированный выбор основного канала обоими операторами

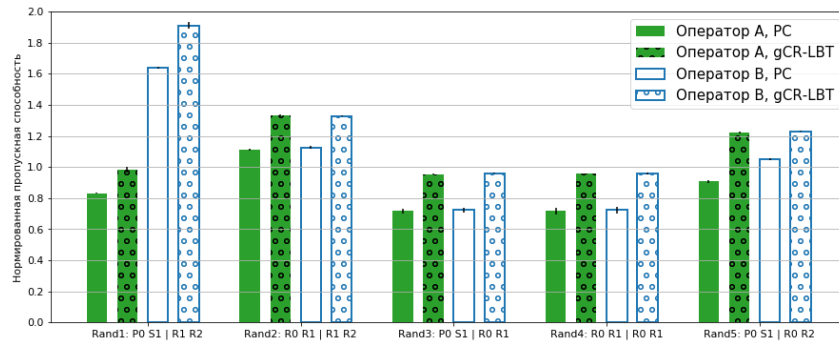


Рис. 4: Сравнение нормированной пропускной способности для обоих операторов при использовании LBT с PC и gCR-LBT, $N_A = N_B = 5$, случайный выбор основного канала одним или двумя операторами

В сценариях Fix3, Fix4, Fix5, Rand3 и Rand4 наблюдается наибольший прирост пропускной способности. Это объясняется тем, что при пересечении основных каналов (или просто совпадении множеств используемых каналов) в конкуренции за каждый канал участвуют станции сразу обоих операторов, что приводит к большему числу коллизий, которые можно разрешить при помощи метода gCR-LBT.

Также отметим, что использование метода gCR-LBT качественно не меняет распределение пропускной способности между операторами относительно метода LBT с PC. Более того, прирост от использования метода gCR-LBT все равно не позволяет компенсировать неудачное расположение основных каналов в отдельных сценариях. Например, использование метода

LBT с PC в сценарии Fix2, где пересекаются только вторичные каналы, все равно обеспечивает выше пропускную способность, чем использование метода gCR-LBT в сценарии Fix5, где пересекаются только основные каналы.

Таблица 2: Сравнение суммарной нормированной пропускной способности при использовании LBT с PC и gCR-LBT

Сценарий	$S_A + S_B$, PC	$S_A + S_B$, gCR-LBT	Прирост, %
Fix1	2,5	2,9	17,5
Fix2	2,5	2,9	16,9
Fix3	1,4	1,9	32,8
Fix4	1,4	1,9	32,8
Fix5	1,7	2,2	33,5
Rand1	2,5	2,9	16,9
Rand2	2,2	2,7	18,9
Rand3	1,4	1,9	33,0
Rand4	1,4	1,9	33,0
Rand5	2,0	2,5	25,3

6 Заключение

В данной работе была исследована эффективность метода разрешения коллизий gCR-LBT в сценариях совместного существования двух операторов NR-U в трех каналах при использовании метода многоканального доступа Type B1. При помощи имитационного моделирования продемонстрировано, что метод gCR-LBT позволяет получить прирост пропускной способности независимо от способа выбора основного канала и их взаимного расположения у разных операторов, который составляет от 17 до 33% в зависимости от сценария.

Список литературы

1. Sathya Vanlin, Rochman Muhammad Iqbal, Ghosh Monisha. Measurement-based coexistence studies of LAA & Wi-Fi deployments in Chicago // IEEE Wireless Communications. — 2020. — Vol. 28, no. 1. — P. 136–143.
2. Sathya Vanlin, Rochman Muhammad Iqbal, Ghosh Monisha. Hidden-nodes in coexisting LAA & Wi-Fi: a measurement study of real deployments // 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops) / IEEE. — 2021. — P. 1–7.
3. Physical Layer Procedures for shared spectrum channel access : Technical specification (TS) : 37.213 / 3rd Generation Partnership Project (3GPP) ; executor: 3GPP : 2021. — 12. — Access mode: <http://www.3gpp.org/DynaReport/37213.htm>. — Version 16.7.0.

4. Исследование многоканального метода доступа в сетях NR-U в сценариях совместного существования двух операторов / Логинов В.А., Троегубов А.Ю., Ляхов А.И. и Хоров Е.М. // Информационные процессы. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 141–154.
5. Логинов В.А., Троегубов А.Ю. Механизм разрешения коллизий с поддержкой мини-слотов для базовых станций сетей 5G NR-U // Сборник трудов конференции «Информационные Технологии и Системы (ИТиС) 2021». — Online. — 2021.
6. Enhanced Collision Resolution Methods With Mini-Slot Support for 5G NR-U / Loginov Vyacheslav, Troegubov Aleksandr, Lyakhov Andrey, and Khorov Evgeny // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — P. 146137–146152.
7. Analytical study of license-assisted access in 5G networks / Kutsevol Polina, Loginov Vyacheslav, Khorov Evgeny, and Lyakhov Andrey // 2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) / IEEE. — 2019. — P. 1–9.
8. Performance Modeling of an LTE LAA and WiFi Coexistence System using the LAA Category-4 LBT Procedure and 802.11e EDCA Mechanism / Zheng Jun, Xiao Jie, Ren Qilei, and Zhang Yuan // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2020.
9. Downlink channel access performance of NR-U: Impact of numerology and mini-slots on coexistence with Wi-Fi in the 5 GHz band / Kosek-Szott Katarzyna, Valvo Alice Lo, Szott Szymon, Gallo Pierluigi, and Tinnirello Ilenia // Computer Networks. — 2021. — Vol. 195. — P. 108–188.
10. Zajac Marek, Szott Szymon. Resolving 5G NR-U Contention for Gap-Based Channel Access in Shared Sub-7 GHz Bands // IEEE Access. — 2022. — Vol. 10. — P. 4031–4047.
11. CR-LBT: Listen-before-talk with collision resolution for 5G NR-U networks / Loginov Vyacheslav, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, and Akyildiz Ian // IEEE Transactions on Mobile Computing. — 2021.
12. Tuladhar Sudat, Cao Lei, Viswanathan Ramanarayanan. Markov chain based performance analysis of LAA and WiFi coexistence in dual carrier aggregation // 2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP) / IEEE. — 2019. — P. 504–508.
13. Kushwaha Himanshu, Kotagi Vijeth, Murthy Siva Ram. On the Effects of Transmit Power Control on Multi Carrier LAA-WiFi Coexistence // IEEE Transactions on Sustainable Computing. — 2021.
14. Tuladhar Sudat, Cao Lei, Viswanathan Ramanarayanan. Fair Coexistence of LAA and WiFi in Multi-Carrier LBT based on Joint Throughput and Airtime Fairness // 2021 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN) / IEEE. — 2021. — P. 147–152.
15. A comparative study on multi-channel access methods in 5G NR-U networks / Zhdanovskiy Vyacheslav, Loginov Vyacheslav, Lyakhov Andrey, and Khorov Evgeny // 2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) / IEEE. — 2020. — P. 1–6.
16. Zhdanovskiy V.D., Loginov V.A., Lyakhov A.I. A Study on the Impact of Out-of-Band Emissions on Performance of 5G New Radio-Unlicensed (NR-U) Networks // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2021. — Vol. 66, no. 6. — P. 784–795.
17. Vu Long Hoang, Yun Ji-Hoon. Adaptive self-deferral for carrier aggregation of LTE-LAA with RF power leakage in unlicensed spectrum // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — P. 89292–89305.

18. Vu Long Hoang, Yun Ji-Hoon. Multi-carrier listen before talk with power leakage awareness for LTE-LAA in unlicensed spectrum // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. — 2019. — Vol. 5, no. 3. — P. 678–689.
19. Maldonado Roberto, Rosa Claudio, Pedersen Klaus I. Multi-link Techniques for New Radio-Unlicensed URLLC in Hostile Environments // 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring) / IEEE. — 2021. — P. 1–6.

Классификация зашифрованного с помощью протокола QUIC трафика с модификацией ESNI*

И.С. Борисов^{1,2}, А.А. Курапов^{1,2}, Д.Р. Шамсимухаметов¹

{borisov, kurapov, shamsimukhametov}@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук

² Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)

Аннотация В последние годы все более широкое распространение приобретает протокол транспортного и прикладного уровней Quick UDP Internet Connections (QUIC). Исследования показали, что по полезной нагрузке первых пакетов сетевого потока можно с высокой точностью определять категорию QUIC-трафика даже в случае скрытого доменного имени сервера, передаваемого в поле Server Name Indication (SNI). Однако с помощью неинтерпретируемых нейросетевых алгоритмов, применяемых в таких исследованиях, невозможно определить, за счет каких параметров протокола осуществляется классификация. Знание данных параметров с одной стороны позволит повысить точность и скорость предсказания за счет анализа лишь необходимой для классификации трафика информации, с другой – выявить уязвимости протокола QUIC. В данной статье разработано расширение известного интерпретируемого алгоритма классификации Transport Layer Security (TLS) трафика Recomposed-Bytes-based Random Forest (RB-RF) для протокола QUIC. Благодаря данному методу впервые выявлены параметры протокола QUIC, вносящие наибольший вклад в классификацию трафика, а также получено снижение доли ошибок классификации по сравнению с существующими аналогами.

1 Введение

В настоящее время на финальном этапе разработки находится протокол прикладного уровня HTTP/3 [1]. Предполагается, что он позволит существенно повысить скорость обмена данными между клиентом и сервером по сравнению со всеми предыдущими версиями HTTP.

Существующие версии протокола работают поверх протокола защиты транспортного уровня Transport Layer Security (TLS) и протокола транс-

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10431, <https://rscf.ru/project/21-79-10431/>.

портного уровня Transmission Control Protocol (TCP). Актуальный стек протоколов TCP-TLS-HTTP имеет ряд недостатков. В частности, для установления безопасного соединения требуется от двух до трех последовательных обменов сообщениями (англ.: Round Trip Time, RTT). В HTTP/3 соединение с неизвестным хостом устанавливается за время 1-RTT, а при повторном подключении к серверу зашифрованные данные клиента передаются уже в первом сообщении.

Кроме того, за счет применения протокола QUIC, основанного на протоколе транспортного уровня User Datagram Protocol (UDP), в HTTP/3 решаются проблемы межпротокольного взаимодействия TCP-TLS-HTTP. Протокол QUIC называют метауровневым (см. рис. 1), так как он сочетает в себе функции протоколов транспортного, сессионного и прикладного уровней. В частности, он обеспечивает надежность доставки, контроль скорости отправки, шифрование и многопоточность.

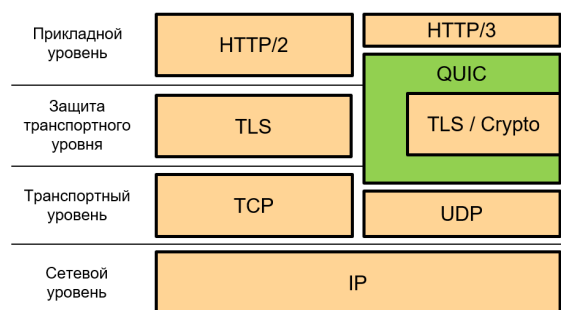


Рис. 1: Стек протоколов при использовании QUIC

Однако, как и трафик TLS, QUIC-трафик не содержит явным образом информацию о типе передаваемых данных, необходимую для обеспечения качества обслуживания [2], а также требуемую в задачах детектирования вредоносного и законодательно запрещенного трафика. Процедура определения категории трафика называется *классификацией трафика*. Объектом классификации трафика, как правило, является сетевой поток, определяемый парами портов транспортного уровня, IP-адресов клиента и сервера, а также используемым протоколом транспортного уровня.

Современные классификаторы QUIC-трафика используют два метода: метод, основанный на анализе статистических данных сетевых потоков (длин пакетов, интервалов между приходами пакетов и функций данных величин) [3], и метод, основанный на анализе полезных данных первых пакетов потока [4, 5]. Задачи обеспечения качества обслуживания требуют классификации трафика в режиме реального времени. Для данных задач метод, основанный на анализе статистических данных, является менее предпочти-

тельным, так как требует для анализа большого числа первых пакетов потока, что приводит к существенному повышению задержки классификации.

Классификаторы второго типа зачастую используют нейронные сети, которые принимают на вход необработанные байты первых пакетов потока. Хотя такие классификаторы достигают высокой точности, они не позволяют проанализировать, какая именно информация в полезной нагрузке вносит вклад в классификацию трафика. Анализ избыточной информации, передаваемой в полезной нагрузке (например, случайные значения, используемые для генерации ключа шифрования), может приводить к снижению эффективности предсказания алгоритмов классификации [6]. Кроме того, знание параметров, влияющих на определение категории трафика, позволит выявить наиболее уязвимую информацию QUIC, передаваемую в открытом виде. Для актуального стека протоколов TCP-TLS-HTTP существует алгоритм RB-RF [6], с помощью которого исследовались параметры, вносящие наибольший вклад в классификацию. Однако структуры данных протоколов и связки протоколов QUIC-HTTP/3 существенно различаются, и напрямую алгоритм RB-RF не может быть применен для классификации трафика QUIC и анализа его параметров.

Из литературы известно, что по параметру протокола QUIC Server Name Indication (SNI), содержащему в открытом виде доменное имя сервера, можно с высокой точностью классифицировать трафик [7]. Однако данный параметр является уязвимым, и в настоящее время развитие протоколов защиты транспортного уровня направлено на то, чтобы его скрыть [8,9]. Современные классификаторы QUIC-трафика, основанные на анализе полезной нагрузки, в частности, обучаются на байтах параметра SNI, и зачастую менее эффективны в сценарии шифрованного SNI (англ.: Encrypted SNI, ESNI).

В данной работе исследуется задача классификации QUIC-трафика с зашифрованным SNI. Подробно исследуются особенности структуры процедуры «рукопожатия» QUIC и реализуется метод классификации TLS-трафика RB-RF [6] для протокола QUIC. Преимуществом данного метода является возможность интерпретировать полученные результаты — выявить, какие параметры QUIC являются наиболее значимыми в задачах классификации трафика для того, чтобы можно было сделать вывод о целесообразности шифрования тех или иных параметров в дальнейшем. Для тестирования методов классификации используется база данных, состоящая из QUIC-трафика 4 приложений: Google Play Music, YouTube, Google Files, Google Hangouts [10].

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приведены структура протокола QUIC и его особенности, важные для решения задачи классификации трафика. В разделе 3 описаны предложенный и существующие методы решения задачи классификации трафика. Далее, в разделе 4, описаны имплементации метода RB-RF и используемая база сетевых потоков. Наконец, в разделе 5 приведено сравнение эффективности имплементированного метода классификации с эффективностью методов, известных из литературы.

2 Протокол QUIC

Протокол QUIC имеет две реализации: Google QUIC [11] (оригинальный протокол, разработанный Google) и IETF QUIC [12] (реализация протокола от Инженерного совета Интернета). Во вторую реализацию интегрирован протокол защиты транспортного уровня TLS 1.3, в котором сохранена оригинальная структура TLS-сообщений и набор используемых TLS-параметров. Поэтому для нее могут быть использованы лучшие существующие методы классификации, реализованные для стека протоколов TCP-TLS-HTTP [10, 13], в том числе RB-RF [6].

В данной статье рассматривается реализация Google QUIC, т.к. она основана на протоколе безопасности QUIC Crypto [14], отличающемся от TLS с точки зрения открытой информации доступной для классификации трафика. В разделе 2.1 описываются особенности установления QUIC-соединения. Содержимое используемых для установления соединения сообщений подробнее анализируется в разделе 2.2.

2.1 QUIC-«рукопожатие»

Процесс установления безопасного соединения между клиентом и сервером называется «рукопожатием» (англ.: handshake). Как при использовании протокола QUIC (см. рис. 2а), так и при использовании связки протоколов TLS-over-TCP (см. рис. 2б), оно осуществляется в начале потока. В отличие от TLS 1.3, в «рукопожатии» которого допускается отправка только двух нешифрованных сообщений «ClientHello» и «ServerHello», в протоколе QUIC клиент и сервер могут обмениваться нешифрованными сообщениями «ClientHello» и «Reject» несколько раз, пока не согласуют параметры соединения.

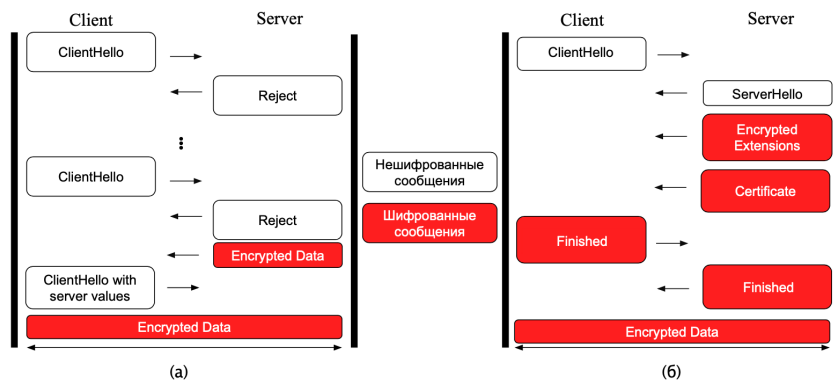


Рис. 2: Сравнение «рукопожатий» (а) QUIC и (б) TLS 1.3

2.2 Структура сообщений «ClientHello» и «Reject»

Рассмотрим более подробно структуру сообщений «ClientHello» и «Reject» в «рукопожатии» QUIC. Прежде всего в данных сообщениях идут общие поля (желтые на рис. 3) в строго фиксированном протоколом порядке и с фиксированной длиной. Параметры, которые могут быть отправлены опционально, в протоколе QUIC Crypto называют *тэгами*. Предпоследнее поле содержит число тэгов (англ. Tag Number). После полей идут имена тэгов (розовые) в порядке их расположения, а также длины (синие) тэгов. Далее отправляется содержимое тэгов (зеленые). Порядок, длины и наличие тэгов не фиксируются протоколом, и их структура может различаться в зависимости от настроек клиентских приложений, генерирующих трафик. Однако каждый тэг может отправляться не более одного раза. В сообщении «ClientHello» может содержаться до 28 тэгов, в сообщении «Reject» – до 17. Важно заметить, что в последнем тэге сообщения «Reject» отправляется сертификат сервера.

Ключевым тэгом для классификации QUIC-трафика является тэг SNI, аналогичный параметру SNI протокола TLS. В сценарии нешифрованного SNI его достаточно для точного определения категории потока. В сценарии скрытого SNI нет параметра, явно указывающего тип трафика, поэтому необходимо применять более сложные методы, такие как алгоритмы машинного обучения, позволяющие анализировать большой набор параметров.

Public Flags	Connection ID	QUIC Version	Packet Number	Message Authentication Hash			
1 byte	8 bytes	4 bytes	1 byte	12 bytes			
Frame Type	Stream ID	Data Len	Message Name	Tag Number	Padding		
1 byte	1 byte	2 bytes	4 bytes	2 bytes	4 bytes		
TAG 1 Name	TAG 1 Len	...	TAG N Name	TAG N Len	TAG 1 Data	...	TAG N Data
4 bytes	4 bytes	...	4 bytes	4 bytes	TAG 1 len bytes	...	TAG N len bytes

(а) Структура сообщения «ClientHello»

Public Flags	Connection ID	Packet Number	Message Authentication Hash				
1 byte	8 bytes	1 byte	12 bytes				
Frame Type	Stream ID	Message Name	Tag Number	Padding			
1 byte	1 byte	4 bytes	2 bytes	4 bytes			
TAG 1 Name	TAG 1 Len	...	Cert	Cert Len	TAG 1 Data	...	Cert Data
4 bytes	4 bytes	...	4 bytes	4 bytes	TAG 1 len bytes	...	TAG N len bytes

(б) Структура сообщения «Reject»

Рис. 3: Структура сообщений (а) «ClientHello» и (б) «Reject»

3 Лучшие известные современные алгоритмы классификации зашифрованного трафика

Существует два основных подхода к классификации зашифрованного трафика: на основе незашифрованной информации в сообщениях обмена криптографическими параметрами и на основе статистических параметров, характерных для потока. Оба этих подхода, как правило, используют алгоритмы машинного обучения или нейронные сети.

Подход, основанный на статистических данных, обеспечивает высокую точность классификации зашифрованного трафика, однако для сбора статистики требуется существенное количество времени, что вносит значительную задержку в классификацию. Поэтому для онлайн-классификации трафика целесообразно применять подход, основанный на анализе незашифрованной информации из первых сообщений рукопожатия.

В исследовании [13] предложен алгоритм классификации трафика, передаваемого с помощью QUIC, который осуществляет классификацию в два этапа: сначала с помощью алгоритма «случайный лес» (англ.: Random Forest, RF) производится разделение потоков на видеопотоки, аудиопотоки и потоки веб-трафика на основе данных внутри пакетов, после чего с помощью сверточной нейронной сети производится второй этап классификации, для которого параметры потока объединяются в одну структуру с параметрами сообщений. В статьях [4,5] рассматриваются алгоритмы классификации трафика, основанные на нейросетях MATEC и BGRUA. В данных работах классификация осуществляется в один этап: все параметры формируют одно признаковое пространство, а полученные значения признаков подаются на вход рекуррентной нейросети.

Также в исследовании классификации трафика [6], защищенного с помощью TLS 1.3 в сценарии расширенной безопасности Encrypted SNI, представлены классификаторы трафика, называемые AB-RF и RB-RF. Первый алгоритм рассматривает несколько пакетов потока, в которых содержится полезная для классификации информация, и использует фиксированное число первых байтов пакетов, обрезая сообщение, или дополняя его с помощью нулей до определенной длины. После этого полученный байт-вектор передается на обработку алгоритму Random Forest. Алгоритм RB-RF извлекает из полученных пакетов информацию, которая требуется для классификации, добавляет ее в вектор на определенные позиции, отбрасывает остальные байты и подает байт-вектор на вход алгоритма случайный лес.

Алгоритм RB-RF показывает точность более 99% и высокую скорость работы для классификации данных, зашифрованных с помощью TLS. Кроме того, с его помощью можно определить какой вклад в классификацию трафика вносят отдельные параметры сообщений, что не позволяют сделать классификаторы, основанные на нейросетях. Однако, метод RB-RF реализован только для классификации трафика, зашифрованного протоколом TLS. В данной работе предлагается расширить этот метод на случай «рукопожатия» протокола QUIC, а также исследовать, какие параметры QUIC вносят наибольший вклад в классификацию трафика.

4 Адаптация алгоритма RB-RF для трафика QUIC

Алгоритм классификации шифрованного трафика RB-RF состоит из двух компонентов (см. рис. 4а): перекомпоновка нешифрованных байт полезной нагрузки служебных сообщений TLS-«рукопожатия» в единый байт-вектор признаков и определение категории трафика с помощью алгоритма Random Forest. Однако напрямую применить его для классификации трафика QUIC невозможно, так как в оригинальном исследовании описывается алгоритм перекомпоновки для TLS 1.3 трафика, который по структуре сообщений и «рукопожатия» значительно отличается от QUIC. Таким образом, этап перекомпоновки нешифрованных байт алгоритма RB-RF необходимо адаптировать под особенности данного протокола.

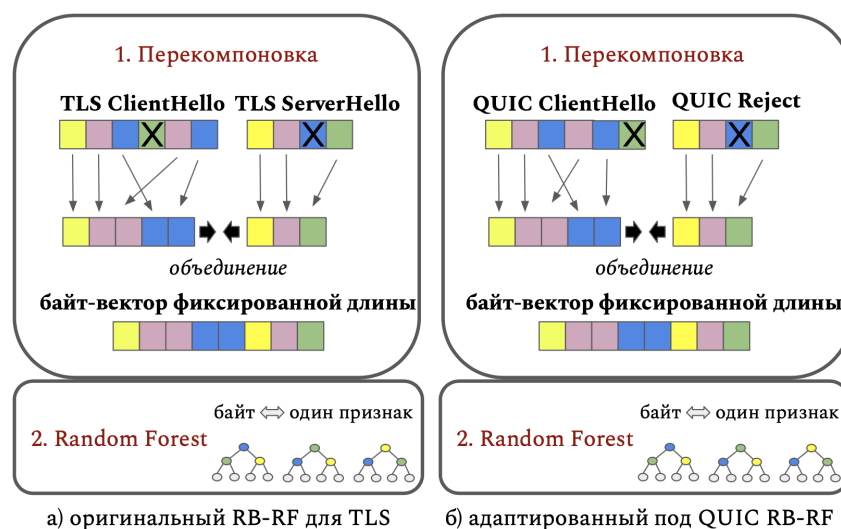


Рис. 4: Алгоритм RB-RF

4.1 Требуемые изменения в методе перекомпоновки.

Необходимые изменения в алгоритме перекомпоновки определяются основными отличиями протоколов TLS и QUIC.

- Структура сообщения «ClientHello» в TLS и QUIC отличается. Таким образом, необходимо разработать новый алгоритм декомпозиции сообщений QUIC и новый алгоритм формирования вектора признаков.

- Протокол QUIC предполагает наличие нескольких сообщений «ClientHello» в одном потоке, содержимое которых может отличаться в зависимости от ответов сервера. Следовательно, чтобы не потерять нешифрованную информацию, которая может являться признаком класса, необходимо осуществлять перекомпоновку для каждого такого сообщения.
- В QUIC добавляется сообщение «Reject», отправляемое сервером в ответ на «ClientHello» и содержащее его нешифрованные данные. Более того, таких сообщений может быть несколько в одном потоке.

Алгоритм перекомпоновки состоит из этапа *декомпозиции* нешифрованных байт сообщений, т.е. извлечения конкретных параметров из сообщений, и этапа *формирования вектора признаков*. Далее будут подробнее описаны изменения в каждом из них.

4.2 Декомпозиция сообщений «ClientHello» и «Reject»

Сообщения «ClientHello» и «Reject» могут быть перекомпонованы в список полей, список порядка тэгов, список длин каждого тэга и непосредственно список значений тэгов.

Порядок и длины полей сообщения «ClientHello» фиксированы протоколом (см. рис. 3), поэтому в имплементации алгоритма RB-RF под них можно выделить фиксированное число байт. В свою очередь, наличие тэгов, их порядок и длины могут отличаться у серверов с различными конфигурациями. Алгоритм 1 вычисляет для «ClientHello» позиции полей, имен тэгов, их длин и значений и определяет в соответствующий набор.

Декомпозиция «Reject» осуществляется схожим образом. Последним тэгом данного сообщения является сертификат сервера, длина которого больше максимального размера IP-пакета. Поэтому обычно оно передается в нескольких IP-пакетах, чаще всего – в двух. Первое содержит поля и тэги, второе – сертификат сервера.

Algorithm 1 Декомпозиция «ClientHello»

Input: P // original CH payload

Steps:

```

1: F = [], N = [], L = [], D = [];
2: F = P[0:36];
3: Tag_N = P[34]; i = 40, L_s = 0
4: while i < 40 + 8*Tag_N do
5:   N.append(P[i:i+4]);
6:   L_cur = 256*P[i+4] + P[i+5];
7:   L.append(P[i+4:i+8]);
8:   D.append(P[40 + 8*Tag_N + L_s : 40 + 8*Tag_N + L_s + L_cur]);
9:   i+=8, L_s+= L_cur;
10: end while=0

```

Output: F, N, L, D // fields, tags names, lengths, data lists

4.3 Формирование единого вектора признаков

После декомпозиции сообщений «ClientHello» и «Reject» необходимо сформировать вектор признаков фиксированного размера, в котором у каждого параметра будет заранее известна позиция и длина.

Структура сообщений «ClientHello» и «Reject» после перекомпоновки представлена на рис. 5а и рис. 5б соответственно. Они состоят из полей фиксированного размера (желтые), индексов имен тэгов (розовые), определяемых как порядковые номера в списке используемых тэгов, длин тэгов (синие) и полезных данных тэгов (зеленые). Если длина какого-то тэга меньше заданной, то его значение дополняется нулями до выбранного. В формировании нового вектора учитывались все тэги, за исключением содержимого тэга PAD, который содержит вектор нулей, дополняющий сообщение до задаваемой клиентом длины, бесполезный с точки зрения классификации. А также не учитывалось содержимое тэга SNI, который в рассматриваемых в работе сценариях считается зашифрованным.

Public Flags	Connection ID				QUIC Version	Packet Number	MAH	Frame Type	Session ID	Data Len	Message Name	Tag Number
1 byte	8 bytes				4 bytes	1 byte	12 bytes	1 byte	1 byte	2 bytes	4 bytes	2 bytes
XLCT index	CCRT index	STK index	SNO index	VER index	CCS index	NONC index	MSPC index	AEAD index	UAID index	SCID index	TCID index	PDMD index
1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte
SNI index	SMHL index	ICSL index	CTIM index	NONP index	PUBS index	MIDS index	SCLS index	KEXS index	IRTT index	CETV index	CFCW index	SFCW index
1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte
XLCT len	CCRT len	STK len	SNO len	VER len	CCS len	NONC len	MSPC len	AEAD len	UAID len	SCID len	TCID len	PDMD len
2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes
SNI len	SMHL len	ICSL len	CTIM len	NONP len	PUBS len	MIDS len	SCLS len	KEXS len	IRTT len	CETV len	CFCW len	SFCW len
2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes
XLCT Data	CCRT Data	STK Data	SNO Data	VER Data	CCS Data	NONC Data	MSPC Data	AEAD Data	UAID Data	SCID Data	TCID Data	PDMD Data
8 bytes	8 bytes	56 bytes	52 bytes	4 bytes	16 bytes	32 bytes	4 bytes	4 bytes	33 bytes	16 bytes	4 bytes	4 bytes
SMHL Data	ICSL Data	CTIM Data	NONP Data	PUBS Data	MIDS Data	SCLS Data	KEXS Data	IRTT Data	CETV Data	CFCW Data	SFCW Data	
4 bytes	4 bytes	8 bytes	32 bytes	32 bytes	4 bytes	4 bytes	4 bytes	8 bytes	164 bytes	4 bytes	4 bytes	

(a)

Public Flags	Connection ID				Packet Number	MAH	Frame Type	Session ID	Message Name	Tag Number
1 byte	8 bytes				1 byte	12 bytes	1 byte	1 byte	4 bytes	2 bytes
STK index	SNO index	PROF index	SCFG index	RREJ index	STTL index	CSCT index	Server Certificate Chain index			
1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte			
STK Len	SNO Len	PROF Len	SCFG Len	RREJ Len	STTL Len	CSCT Len	Server Certificate Chain Len			
2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes			
STK index	SNO index	PROF index	SCFG index	RREJ index	STTL index	CSCT index	Server Certificate Chain index			
56 bytes	52 bytes	256 bytes	159 bytes	4 bytes	8 bytes	242 bytes	1200 bytes			

(б)

Рис. 5: Структура (а) «ClientHello» и (б) «Reject» после перекомпоновки

1st ClientHello Recomposed	2nd ClientHello Recomposed	3rd ClientHello Recomposed	1st Reject Recomposed	2nd Reject Recomposed	3rd Reject Recomposed
-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Рис. 6: Итоговый объединенный вектор параметров

Итак, вектор параметров алгоритма RB-RF имеет следующую структуру (см. рис. 6): сначала три первых перекомпонованных сообщения «ClientHello», после чего – три первых перекомпонованных сообщения «Reject». Если каких-то сообщений в потоке меньше трех, то недостающие векторы заменяются нулями. Если больше трех — берутся только первые три.

5 Параметры эксперимента

5.1 База данных

Для обучения и тестирования алгоритмов классификации используется открытая база данных трафика QUIC [10]. База данных содержит трафик 4 приложений: Google Play Music, YouTube, Google Files, Google Hangouts. База данных размечена на 11 классов по маскам SNI, каждая маска соответствует одному определенному типу трафика, который генерируется определенным сервисом Google, например, googlevideo.com — маска SNI для видеопотоков из Youtube, а yt3.ggpht.com — маска SNI для изображений из Youtube. В таблице 1 для каждой маски SNI указано число потоков выборок каждого из представленных в базе сервисов. В данной работе рассматривались только те сервисы, мощность класса которых составляла не менее 150 потоков. Поэтому суммарно в рассматриваемой базе получилось 11232 потоков.

Таблица 1: База данных QUIC

Маска sni класса	тип трафика	Мощность выборки
googlevideo.com	буферизованное видео	2900
play.google.com	буферизованное аудио	150
i.ytimg.com	веб (картинки)	1095
www.google.com	веб (веб-страница)	965
www.google.com.vn	веб (веб-страница)	970
googleads.g.doubleclick.net	веб (реклама)	1975
pagead2.googleadsyndication.com	веб (реклама)	990
yt3.ggpht.com	веб (шрифты)	520
www.googleadservices.com	веб (реклама)	1090
www.googleapis.com	веб (статистика)	295
safebrowsing.googleapis.com	веб (статистика)	280

5.2 Моделирование сценариев шифрованного SNI

Так как на данный момент шифрование SNI в протоколе QUIC не используется, для сравнения эффективности алгоритмов классификации такой трафик моделируется путем изменения базы данных существующих QUIC-потоков. В данной работе рассматриваются два следующих сценария.

- **Сценарий 1.** Значение тэга SNI заменяется вектором нулей соответствующей длины. Данный сценарий моделируется во многих статьях по классификации трафика [2, 4, 5, 11], так как прост в реализации, однако он имеет существенный недостаток – длина SNI открыта и является существенной утечкой в конфиденциальности. Таким образом, данную модель шифрования SNI можно считать неполной.
- **Сценарий 2.** Исходное значение тэга SNI удалено. Также удален тэг PAD, дополняющий длину сообщения до фиксированного значения и косвенно выдающий длину SNI [6]. Значение параметров длин и имен соответствующих тэгов также удаляется. Таким образом, моделируется сокрытие как значения SNI, так и его длины.

6 Полученные результаты и их анализ

Для сравнения предложенного и базовых методов классификации трафика используется средняя доля ошибок — усредненная между всеми классами доля неверно классифицированных потоков. Результаты, представленные на рис. 7, показывают, что адаптированный алгоритм RB-RF более чем в 2 раза превосходит базовые алгоритмы MATEC и BGRUA в обоих рассматриваемых сценариях. Это достигается за счет аккуратного размещения параметров QUIC по фиксированным позициям в векторе признаков.

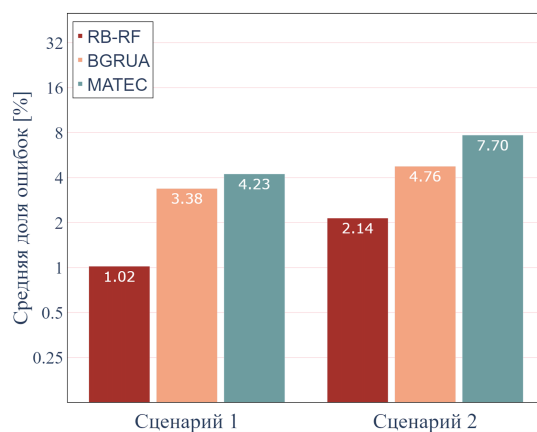


Рис. 7: Сравнение средней доли ошибок RB-RF и базовых классификаторов.

6.1 Исследование важности открытых параметров QUIC

Как показывают результаты классификации, можно с высокой точностью определить сервис, генерирующий трафик QUIC, даже в случае, когда доменное имя сервера и его длина скрыты. Это означает, что шифрования SNI недостаточно, чтобы сделать сервисы неотличимыми и трафик QUIC содержит другую уязвимую информацию.

Чтобы определить, какие параметры QUIC наиболее уязвимы, их важность исследуется с помощью адаптированного алгоритма RB-RF. В отличие от существующих нейросетевых классификаторов, RB-RF позволяет интерпретировать полученные результаты с помощью встроенного в Random Forest метода Feature Importance на базе метрики Gini Impurity. На рис. 8 представлены полученные с помощью этого метода поля и тэги сообщений «рукопожатия», проранжированные по вносимому вкладу в классификацию трафика, нормированные на максимальное значение. Feature Importance определяется с помощью скрытия признака в объектах датасета валидации, при неизменности остальных. В случае существенного понижения точности классификации признак считается «важным» и ему присваивается большее значение Feature Importance в пределах от 0 до 1, по сравнению с «неважным» признаком. Таким образом, показатель Feature Importance указывает на то, какой вклад тот, или иной признак вносит в классификацию. Согласно полученным результатам, основной вклад в классификацию трафика вносят следующие 3 параметра:

- XLCT (CH) – хэшированный сертификат, который, как ожидает клиент, будет использовать сервер.
- CCRT (CH) – серия хэшированных сертификатов для данного сервера, предоставляемых клиенту удостоверяющим центром.
- Cert (Rej)– цепочка сертификатов сервера.

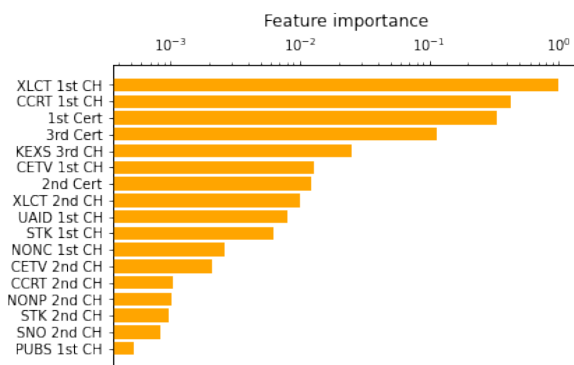


Рис. 8: Важность признаков, вносящих вклад в классификацию трафика

6.2 Влияние важных признаков на результат классификации

В данном эксперименте исследовалась зависимость средней доли ошибок от числа шифрованных параметров, вносящих наибольший вклад в классификацию. Первое измерение было проведено в сценарии 2. Далее, из вектора признаков последовательно убирались тэги, вносящие наибольший вклад в классификацию.

Из рис. 9 видно, что основной вклад в классификацию дает сертификат сервера, передаваемый в последнем тэге сообщения «Reject». При сокрытии сертификата доля ошибки возрастает более, чем на 25%. Далее, доля ошибок возрастает почти до 50% при сокрытии тэгов XLCT (хэш листового сертификата, который клиент ожидает получить), необязательного тэга CCRT (содержащего хэши всех сертификатов сервера из цепочки удостоверяющего центра), тэга CETV (содержащего шифрованную информацию клиента: сертификат клиента, ChannelID и др.), опционального тэга STK (содержащего токен сервера, который был получен при предыдущих соединениях). При сокрытии остальных тэгов, таких как тэг NONC (в котором содержится отметка времени UNIX timestamp), тэга CCS (набор сертификатов, известных клиенту) и других, средняя доля ошибки превышает 50%.

Таким образом, основной вклад в классификацию QUIC-трафика вносят тэги, связанные с сертификатом сервера. Следовательно, для повышения пользовательской конфиденциальности, прежде всего в протоколе QUIC следует защитить сертификат, передаваемый в настоящее время в открытом виде. Стоит отметить, что в протоколе TLS аналогичная уязвимость была устранена за счет шифрования сертификата с помощью предварительных ключей шифрования TLS-«рукопожатия» pre-shared key [15].

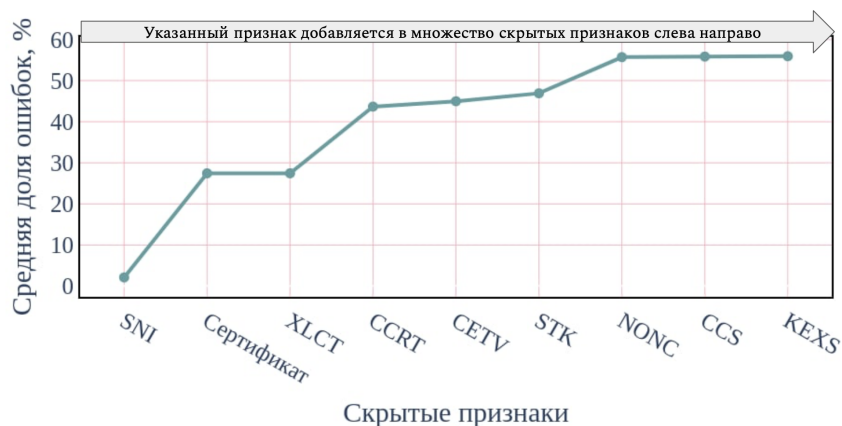


Рис. 9: Зависимость ошибки RB-RF от скрывааемых параметров QUIC

6.3 Оценка качества поклассовой классификации в сценарии скрытых SNI и цепочки сертификатов

Результаты классификации, полученные в сценарии, когда скрыта как информация о SNI, так и все данные о сертификатах (точка CETV на рис. 9), убедительны с точки зрения обеспечения конфиденциальности действий пользователя. Чтобы сделать вывод с точки зрения предоставления качества обслуживания, необходимо оценить качество классификации по типу трафика.

В таблице 2 представлены результаты поклассовой классификации адаптированного алгоритма RB-RF на рассматриваемой базе данных в сценарии скрытых SNI и тегов CRT сообщения «Reject» и CCRT, XLCT, CETV сообщения «ClientHello», раскрывающих информацию о сертификатах клиента и сервера. Результаты приведены в метрике доля ошибок класса, т.е. доля неверно классифицированных объектов этого класса. Как видно, низкое среднее значение доли ошибок при классификации по сервисам получается из-за того, что сервисы, генерирующие различный веб-трафик, практически неотличимы друг от друга. При этом при классификации по типам трафика категории определяются с низкой долей ошибок. Это означает, что в таком сценарии сервисы можно с высокой точностью приоритезировать согласно типу трафику. Таким образом, шифрование SNI и сертификата трафика QUIC значительно повысит конфиденциальность пользователя, позволяя классифицировать трафик по типу передаваемых данных для определения категории обслуживания.

Таблица 2: Результаты классификации RB-RF по типам трафика в сценарии шифрованных SNI и сертификатов.

Класс (тип трафика)	Сервисы	Доля ошибок класса
<i>буферизованное видео</i>	googlevideo.com	0%
<i>буферизованное аудио</i>	play.google.com	3,3%
<i>веб-трафик</i>	i.ytimg.com www.google.com www.google.com.vn googleads.g.doubleclick.net pagead2.googleadsyndication.com yt3.ggpht.com www.googleadservices.com www.googleapis.com safebrowsing.googleapis.com	0%

7 Заключение

В данной работе была предложена адаптация алгоритма классификации шифрованного трафика RB-RF [6] для QUIC трафика. В частности, был разработан алгоритм перекомпоновки нешифрованных сообщений QUIC в единый байт-вектор признаков фиксированной длины. Эффективность адаптированного под QUIC алгоритма RB-RF исследовалась в различных сценариях скрытого параметра SNI, которое напрямую указывает доменное имя сервера. Для этого использовалась открытая база данных из работы [10], состоящая из QUIC-трафика 4 приложений Google. На открытой базе данных имплементированный алгоритм превзошел более чем в 2 раза базовые алгоритмы, основанные на нейросетях MATEC и BGRUA из работ [4, 5]. Кроме того, в данной статье впервые были интерпретированы результаты классификации QUIC-трафика: параметры QUIC проранжированы по вносимому вкладу в классификацию трафика. Исследовалась зависимость ошибки классификации от параметров QUIC, которые потенциально могут быть скрыты. Показано, что основной вклад в классификацию вносят параметры, содержащие информацию о сертификате сервера. Продемонстрировано, что даже при полном сокрытии информации о сертификате, с помощью адаптированного алгоритма RB-RF под трафик QUIC удается с высокой точностью определять тип передаваемых данных, и, соответственно, категорию обслуживания трафика.

Список литературы

1. Bishop Mike. HTTP/3. — RFC 9114. — 2022. — June. — Access mode: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9114>.
2. A review on machine learning-based approaches for Internet traffic classification / Salman Ola, Elhajj Imad H, Kayssi Ayman, and Chehab Ali // *Annals of Telecommunications*. — 2020. — Vol. 75, no. 11. — P. 673–710.
3. A novel QUIC traffic classifier based on convolutional neural networks / Tong Van, Tran Hai Anh, Souihi Sami, and Mellouk Abdelhamid // *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* / IEEE. — 2018. — P. 1–6.
4. Attention-based bidirectional GRU networks for efficient HTTPS traffic classification / Liu Xun, You Junling, Wu Yulei, Li Tong, Li Liangxiang, Zhang Zheyuan, and Ge Jingguo // *Information Sciences*. — 2020. — Vol. 541. — P. 297–315.
5. MATEC: A lightweight neural network for online encrypted traffic classification / Cheng Jin, Wu Yulei, Yuepeng E, You Junling, Li Tong, Li Hui, and Ge Jingguo // *Computer Networks*. — 2021. — Vol. 199. — P. 108472.
6. Is Encrypted ClientHello a Challenge for Traffic Classification? / Shamsimukhametov D, Kurapov A, Liubogoshchev M, and Khorov E // *IEEE Access*. — 2022. — Vol. 7.
7. Are Neural Networks the Best Way for Encrypted Traffic Classification? / Shamsimukhametov D, Liubogoshchev M, Khorov E, and Akyldiz IF // *2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)* / IEEE. — 2021. — P. 1–5.

8. Does domain name encryption increase users' privacy? / Trevisan Martino, Soro Francesca, Mellia Marco, Drago Idilio, and Morla Ricardo // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. — 2020. — Vol. 50, no. 3. — P. 16–22.
9. TLS Encrypted Client Hello : Internet-Draft : draft-ietf-tls-esni-14 / Internet Engineering Task Force ; executor: Rescorla Eric, Oku Kazuho, Sullivan Nick, Wood Christopher A. : 2022. — Feb. — 48 p. Access mode: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-tls-esni/14/>. — Work in Progress.
10. Rezaei Shahbaz, Liu Xin. How to achieve high classification accuracy with just a few labels: A semi-supervised approach using sampled packets // arXiv preprint arXiv:1812.09761. — 2018.
11. Langley Adam, Chang Wan-Teh. QUIC Crypto // Google, Revision. — 2016. — Vol. 20161206. — P. 2016.
12. Iyengar Jana, Thomson Martin et al. QUIC: A UDP-based multiplexed and secure transport // Internet Engineering Task Force, Internet-Draft draft-ietf-quic-transport-27. — 2020.
13. Rezaei Shahbaz, Liu Xin. Multitask learning for network traffic classification // 2020 29th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN) / IEEE. — 2020. — P. 1–9.
14. Carlucci Gaetano, De Cicco Luca, Mascolo Saverio. HTTP over UDP: an Experimental Investigation of QUIC // Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on Applied Computing. — 2015. — P. 609–614.
15. Rescorla Eric. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3. — RFC 8446. — 2018. — Aug. — (Accessed on 13/09/2022). Access mode: <https://tools.ietf.org/html/rfc8446>.

Сравнительный анализ LDPC декодеров с неравной степенью квантования для разных типов сообщений. *

Д.И. Воробьев^{1,2}, В.А. Гаев³

¹ Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук

³ Huawei Technologies Co. Ltd.

Аннотация В данной работе представлено сравнение грубо квантованных LDPC декодеров с различной степенью квантования. Методом квантования (сжатия) пересылаемых в ходе декодирования сообщений является метод информационно-узкого места (англ.: Information bottleneck method — IB). Пересылаемые между переменными (англ.: Variable Node, VN) и проверочными (англ.: Check Node, CN) узлами сообщения передаются и обрабатываются в сжатом виде, при чем степень сжатия сообщений из CN в VN может быть ниже, чем из VN в CN. Результаты моделирования показывают, что небольшое снижение точности сообщений из CN в VN относительно мало влияет на корректирующую способность декодера.

1 Введение

Коды с малой плотностью проверок на чётность (англ.: Low-Density Parity-Check — LDPC) [1] широко применяются в системах беспроводной связи и хранения данных. LDPC код задается бинарной матрицей H . Для декодирования по матрице строится двудольный граф (граф Таннера [2]). В этом графе вершины одной доли обозначают столбцы матрицы, а вершины другой — строки. Вершины, соответствующие столбцам, обозначим VN, а вершины строк — CN. Вершины соединены ребром, тогда и только тогда, когда на пересечении соответствующей строки и столбца в матрице H значение равно единице. В процессе декодирования по ребрам графа итеративно пересылаются некоторые численные значения — сообщения.

Различные реализации LDPC декодеров, как правило, отличаются друг от друга правилами формирования и пересчета сообщений. В практических

* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

системах LDPC декодерам требуются входные данные с конечной точностью, и, следовательно, необходимо выполнять квантование (сжатие) сообщений. В этом контексте LDPC декодеры, использующие грубо квантованные сообщения, привлекли большое внимание в недавней литературе [3–6]. Вместо хранения и передачи большого количества бит информации, передаваемые величины квантуются до нескольких бит на сообщение и передаются и пересчитываются в квантованном виде. Благодаря грубому квантованию сообщений вычислительная сложность декодирования может быть значительно снижена.

Квантование декодеров — одно из ключевых направлений исследований в области LDPC кодов. Построение грубо квантованных декодеров подробно описано в [6]. Вместо вычислений над числами с плавающей точкой используются таблицы перехода (англ.: LookUp Table — LUT). Таблицы перехода строятся с учетом максимизации взаимной информации на основе метода информационно-узкого места (англ.: Information bottleneck method — IB), описанного в [7].

Аналогичный метод квантования используется в [4], при этом допускается различная степень квантования для сообщений, пересылаемых в ходе декодирования, и входных (канальных) сообщений.

Существующие LDPC декодеры используют одинаковую степень квантования для VN-CN и CN-VN сообщений. Это позволяет максимизировать взаимную информацию при фиксированной степени квантования. Ключевая идея этой работы заключается в разной степени квантования для сообщений из VN в CN и из CN в VN. Снижение точности части сообщений позволяет снизить используемую при декодировании память при относительно малом снижении корректирующей способности декодера.

Декодеры с различной степенью квантования для сообщений VN-CN и CN-VN упоминаются в литературе [8], однако использование различной степени квантования для IB декодеров не исследовались.

2 Архитектура исследуемых декодеров

Тестируемые декодеры сконструированы с учетом грубого квантования сообщений. Вместо вычислений над числами с плавающей точкой используются таблицы перехода. Таблицы перехода строятся с учетом максимизации взаимной информации на основе IB, описанного в [7]. Отметим, что LUT этих декодеров разработаны на основе эволюции плотности (англ.: density-evolution — DE) с учетом оптимальной схемы квантования, для максимизации взаимной информации между квантованными сообщениями и соответствующими кодированными битами. LUT разработаны на основе оптимального квантования с использованием методов динамического программирования, описанных в [9]. Поскольку размер LUT экспоненциально

растет с увеличением количества смежных вершин, большие LUT раскладываются в серию небольших LUT для экономии памяти. Таким образом, каждая LUT имеет два входа и один выход. Это может снижать корректирующую способность декодеров из-за потери взаимной информации.

Построение грубо квантованных декодеров на основе ИВ подробно описано в [6].

3 Результаты

Были получены коэффициенты битовых ошибок (англ.: Bit Error Ratio, BER) для построенных декодеров с помощью моделирования методом Монте-Карло. Полученные результаты сравниваются с результатами тестирования декодеров, построенных на основе метода максимального правдоподобия (англ.: belief propagation — BP) и мин-суммы (англ.: min-sum — MS). Построенные декодеры обозначаются ИВ(q_1, q_2), где q_1 количество бит квантования для сообщений из VN в CN, а q_2 — количество бит квантования для сообщений из CN в VN.

Для моделирования зашумленного канала использовался канал с аддитивным белым гауссовским шумом и двоичной фазовой манипуляцией сообщений. Все ИВ декодеры построены с использованием density evolution, стартовое (канальное) распределение — нормальное распределение для $Eb/N_0 = 1.27$ дБ, как оптимальное с точки зрения максимизации взаимной информации [6].

Декодеры тестировались на двух регулярных (3, 6) матрицах, промаркированных 204.33.484 и 8000.4000.3.483 в [10]. Подробные параметры матриц приведены в таблице 3. Отметим, что для простоты в качестве первого числа маркера используется длина кода матриц. При тестировании использовалось различное количество итераций декодирования от, 10 до 50.

Таблица 1. Параметры тестируемых матриц.

Название	Длина кода	кодовая скорость	вес столбца-строки
204.33.484	204	1/2	3-6
8000.4000.3.483	8000	1/2	3-6

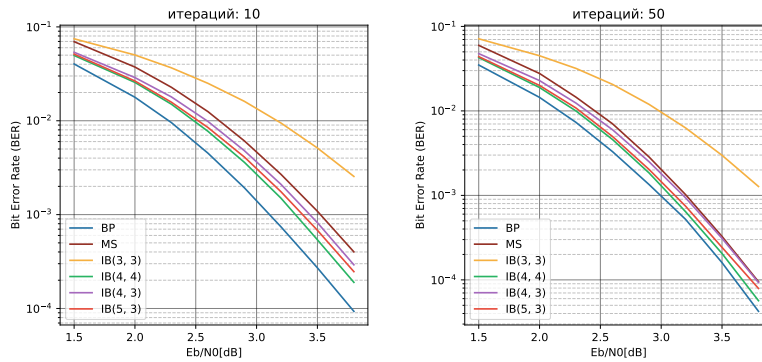


Рис. 1. Результаты моделирования для матрицы 204.33.484.

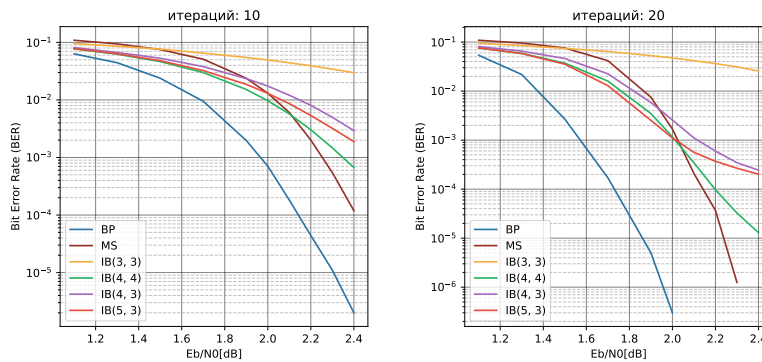


Рис. 2. Результаты моделирования для матрицы 8000.4000.3.483.

На рис. 1 изображены результаты моделирования для матрицы 204.33.484, на рис. 2 — для матрицы 8000.4000.3.483. Как показано на рис. 1 на матрице 204.33.484 декодер IB(4, 3) заметно обгоняет IB(3, 3) и отстает менее чем в 2 раза от IB(4, 4). То есть небольшое уменьшение битности сообщений CN-VN не ведет к заметному падению производительности декодера, в то время как уменьшение битности с 4 до 3 обоих видов сообщений (VN-CN и CN-VN) значительно снижает корректирующую способность декодера.

На большей матрице 8000.4000.3.483 (см. рис. 2) понижение точности на CN-VN сообщениях заметно снижает корректирующую способность. Однако, для декодера IB(3, 3) BER вовсе не опускается ниже 10^{-2} .

4 Заключение

В данной работе протестированы грубо квантованные IB декодеры с различной степенью квантования для сообщений VN-CN и CN-VN. Моделирование показало, что небольшое снижение точности квантования для сообщений CN-VN относительно мало снижает корректирующую способность декодера. Снижение же точности обоих видов сообщений CN-VN и VN-CN снижает корректирующую способность много больше. Вместе с тем, дальнейшее увеличение точности сообщений VN-CN не приводит к весомому изменению результатов тестирования. Таким образом, использование различной степени квантования для сообщений VN-CN и CN-VN целесообразно при разнице не больше чем в один бит — это позволяет наиболее эффективно использовать каждый бит передаваемых сообщений.

Литература

- [1] Gallager Robert. Low-density parity-check codes // IRE Transactions on information theory. — 1962. — Vol. 8, no. 1. — P. 21–28.
- [2] Tanner R. A recursive approach to low complexity codes // IEEE Transactions on information theory. — 1981. — Vol. 27, no. 5. — P. 533–547.
- [3] Ghaffari Fakhreddine, Le Khoa, Declercq David. The Probabilistic Finite Alphabet Iterative Decoder for Low-Density Parity-Check Codes // 2019 17th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEW-CAS) / IEEE. — 2019. — P. 1–4.
- [4] Meidlinger Michael, Matz Gerald, Burg Andreas. Design and decoding of irregular LDPC codes based on discrete message passing // IEEE Transactions on Communications. — 2019. — Vol. 68, no. 3. — P. 1329–1343.
- [5] Decoding rate-compatible 5G-LDPC codes with coarse quantization using the information bottleneck method / Stark Maximilian, Wang Linfang, Bauch Gerhard, and Wesel Richard D // IEEE Open Journal of the Communications Society. — 2020. — Vol. 1. — P. 646–660.
- [6] Lewandowsky Jan, Bauch Gerhard. Information-optimum LDPC decoders based on the information bottleneck method // IEEE Access. — 2018. — Vol. 6. — P. 4054–4071.
- [7] Tishby N., Pereira F. C., Bialek W. The information bottleneck method // 37th Allerton Conference on Communication and Computation. — 1999.
- [8] Analysis and design of cost-effective, high-throughput LDPC decoders / Nguyen-Ly Thien Truong, Savin Valentin, Le Khoa, Declercq David, Ghaffari Fakhreddine, and Boncalo Oana // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. — 2017. — Vol. 26, no. 3. — P. 508–521.
- [9] Kurkoski Brian M, Yagi Hideki. Quantization of binary-input discrete memoryless channels // IEEE Transactions on Information Theory. — 2014. — Vol. 60, no. 8. — P. 4544–4552.
- [10] MacKay David JC. Encyclopedia of sparse graph codes. — 2005.

Построение и исследование грубоквантованного послоевого декодера с помощью информационного подхода *

О. Ю. Курилов^{1,3}, В. А. Гаев²

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

² Huawei Technologies Co. Ltd.

³ Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики

Аннотация Данная работа посвящена исследованию MinLUT декодера с различными видами квантования. В ходе исследования обнаружено, что с некоторого момента число итераций декодера играет незначительную роль в производительности декодера вне зависимости от вида квантования. Данная статья частично посвящена исследованию именно этого эффекта.

1 Введение

В современных коммуникационных системах огромную роль играют коды с малой плотностью проверок (англ.: Low-Density Parity-Check, LDPC). Данный класс кодов отличается хорошей производительностью при малых затратах на память, а также возможностью легкой параллелизации для эффективных вычислений.

Одним из первых алгоритмов декодирования LDPC кодов является алгоритм распространения доверия (англ.: Belief Propagation, BP), описанный подробно в [1]. Алгоритм распространения доверия пришел из теории информации, где основывался на идее обработки входящих сообщений для каждого элемента, участвующего в алгоритме и передаче обработанных сообщений соседям. Основным недостатком данного декодера является то, что он работает с числами с плавающей точкой. Одним из решений данной проблемы является рассмотрение квантованных декодеров. Одними из примеров таких декодеров являются Information Bottleneck (IB) и MinLUT, основанные на максимизации взаимной информации, описанные в [10].

Производительность данных декодеров сильно зависит от метода квантования, то есть преобразования вещественной прямой в конечный набор

* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

значений, и от числа максимальных итераций декодера. Существующие работы исследуют производительность лишь при фиксированных параметрах квантования, не сравнивая поведение при различном числе итераций, например в статьях [2], [8] и [10]. Как показывает работа [10] производительность ИВ сильно зависит от метода квантования, но не было произведено сравнительного анализа построения, касаемого числа итераций.

В данной работе рассмотрен MinLUT декодер с восьмью различными видами квантования. Для каждого из них будет проведено моделирование на различных уровнях SNR (Signal-Noise Ratio) и для различного числа итераций. В ходе исследования обнаружено, что с некоторого момента число итераций декодера играет незначительную роль в производительности декодера. Данная статья частично посвящена изучению именно этого эффекта.

Изложение представлено следующим образом. Во втором разделе представлена информация о архитектуре квази-циклических декодеров для LDPC кодов. Раздел 3 посвящен описанию нелинейного квантования. В разделе 4 подробнее описывается используемая модель. В параграфе 5 представлены результаты работы.

2 Архитектура квази-циклических декодеров для LDPC кодов

На практике для построения декодеров, основанных на LDPC кодах часто используют квази-циклические матрицы. Этот класс матриц обладает блочной структурой, где каждый блок есть смещенная по модулю единичная матрица, либо же нулевая матрица. Из-за данной блочной структуры возможно экономить на памяти при построении Look Up Tables (Подробнее в разделе 3). Так как из-за выбора матриц каждая VN используется ровно 1 раз, то появляется идея обновлять рёбра из CN в VN после каждого обновления рёбер из VN в CN. Данный подход и будет использоваться в данной статье.

Преимущество такого подхода заключается в том, что на одной итерации происходит больше обновлений и из-за чего информация с ребер обновляется и быстрее и как следствие увеличивается скорость сходимости по итерациям, что является важным улучшением, так как через некоторое время нарушается предположение о независимости входящей информации и алгоритм начинает работать плохо. Минус данного подхода заключается в том, что одна итерация происходит дольше.

3 Нелинейное квантование

У ВР декодера есть существенный недостаток, он работает с числами большой разрядности и выполняет тяжелые операции по преобразованию сообщений на ребрах из CN в VN, решению данной проблемы посвящено большое число работ, некоторые из которых будут описаны ниже. Одним из самых известных приближений является алгоритм MIN-SUM, описанный в [5].

Также есть метод уменьшения битности, приводимый в [6]. Вкратце, рассматривается отображение $\varphi: \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{N}$, $\mathcal{N} = \{-2^s + 1, \dots, -1, 1, \dots, 2^s - 1\}$. Отображение φ должно быть симметричным, а именно: $\forall x \in \mathbb{R}$ выполнено $\varphi(x) = -\varphi(-x)$. Благодаря малой разрядности можно оптимизировать операции, проводимые с ними для достижения лучшей производительности кода. Из-за чего при не очень большом проигрыше в производительности кода можно сильно выиграть по памяти и времени работы алгоритма, так как работа и передача данных будет происходить с малобитными числами.

Говоря более подробно, существует два вида квантования – линейный и нелинейный. При линейном отрезки разбиения имеют одинаковую длину либо в стандартном расстоянии, либо в логарифмическом смысле. При нелинейном квантовании отрезки имеют произвольную длину. Основной задачей квантования является разбить вещественную прямую на конечное число интервалов. На практике данную задачу упрощают, вместо всей числовой прямой рассматривают лишь конечный отрезок, предполагая, что вероятность оказаться вне отрезка пренебрежимо мала. Вторым этапом для упрощения задачи нелинейного квантования является разбиение отрезка на большее количество частей. После данных двух оптимизаций можно говорить о дискретной задаче оптимальной кластеризации дискретного множества объектов.

В частности, в данной работе вместо числовой прямой будет рассмотрен отрезок $[-10, 10]$ и, в качестве второй оптимизации, будет разбит на 20000 частей. Таким образом, длина одного отрезка станет равной 0.001 и плотность распределения у левой и правой границы будут практически равны, что позволит говорить о равномерном распределении внутри одного отрезка. Один из вариантов квантования вещественной прямой будет подробнее описан в разделе 4.

4 Описание модели

В данной статье будет использован метод квантования, основанный на построении таблиц проверок (англ.: Look Up Tables, LUT). Данный метод подробно описан в [10]. Вкратце, пусть есть множество $X = \{-x_n, \dots, x_n\} \setminus \{0\}$, которое случайно отображается в множество $Y = \{-y_m, \dots, y_m\} \setminus \{0\}$. После

чего данное множество отображается в множество $Z = \{-z_k, \dots, z_k\} \setminus \{0\}$, $k < m$. В случае декодирования множество $X = \{-1, 1\}$. Тогда если выполнены условия на сортировку $\text{LLR} - \text{LLR}(y_1) \leq \text{LLR}(y_2) \leq \dots \leq \text{LLR}(y_m)$ – то тогда можно построить алгоритм, оптимально квантующий X в Z . Так решается проблема оптимального квантования и отрезка, и построения таблиц, ведь если сообщения приходят независимо, то их общий LLR будет просто суммой LLR-ов.

Данный метод показывает хорошие результаты, как было указано в [10], но имеет ряд недостатков, о которых пойдет речь в разделе 6.

Ранее считалось, что длина кода у нас бесконечная и ошибок случиться в точности столько, сколько заложено по нашим параметрам. Если длина кода будет бесконечной, то по усиленному закону больших чисел квантованное распределение при длине кода к бесконечности сойдется к вероятности ошибки. Однако на практике длина кода конечна, а значит и распределение у нас будет другое. В [9] описывалось использование конечной длины для поиска предельной дисперсии для заданной вероятности ошибки, из-за чего получался результат лучше. Можно использовать тот же метод для построения распределения. Итак, пусть у нас есть кодовое слово длины n , через $P(\text{error} = k)$ будем обозначать вероятность появления ровно k ошибок после декодирования. Пусть $p(x)$ - плотность распределения вероятностей при ожидаемой части ошибок x . Тогда можно получить по формуле полной вероятности чуть более точную модель распределения с учетом конечной длины кода $\text{pdf}_f(x)$:

$$\text{pdf}_f(x) = \sum_{k=0}^n P(\text{error} = k) \cdot \text{pdf}_f\left(x \mid \text{error} = \frac{k}{n}\right)$$

Можно считать, что $\text{pdf}_f\left(x \mid \text{error} = \frac{k}{n}\right) = p\left(\frac{k}{n}\right)$, то тогда в среднем на разных дисперсиях будет получаться лучший результат, так как учитывается смесь распределений при разных показателях ошибок, а не одно единственное.

5 Результаты

В данной статье предлагается рассмотреть MinLUT декодер, то есть обновление сообщений из VN в CN будет происходить за счет оптимизации min-sum, введенной ранее. Обновления же обратных сообщений будет происходить за счет таблиц проверок. Моделирование производилось на регулярной квази-циклической матрице размером 3 на 8 с размером циркулянта 128. Параметр сдвига в каждом блоке выбирался случайно.

На Рис. 1 сравнивается производительность различных декодеров при пяти, десяти и пятнадцати итерациях соответственно. Различные кривые

характеризуются тремя параметрами – сначала идет указание какой режим был использован для построения, с учетом конечной длины или нет, затем идет количество бит, с помощью которых происходило квантование и последним аргументом идет стартовый SNR, который был использован при построении табличек. Также были добавлены классические sum-product и min-sum декодеры.

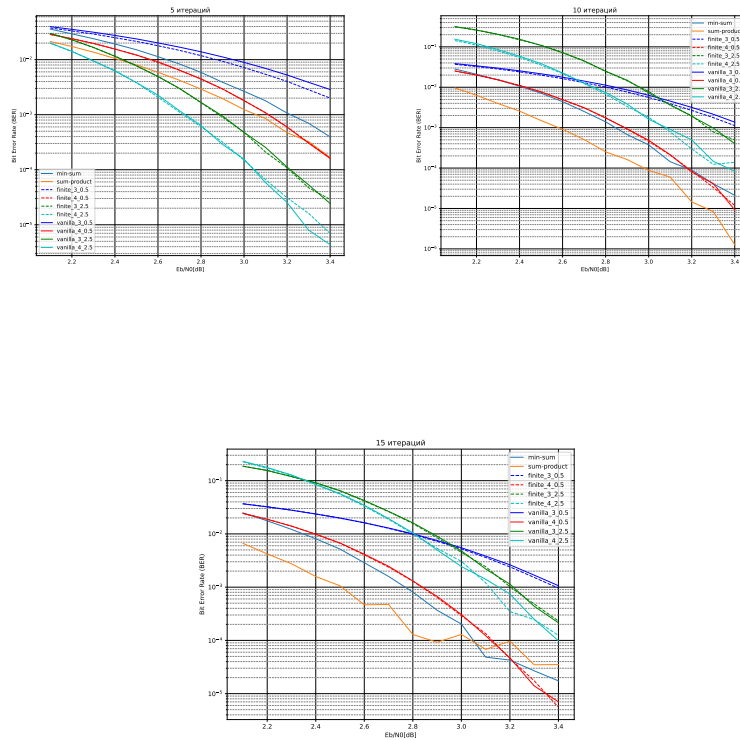


Рис. 1. Результат моделирования различных методов квантования для MinLUT декодера с 5, 10 и 15 итерациями.

Видно, что при разном количестве итераций графики показывают разную производительность. Так на 5 итерациях построенные на SNR = 2.5 декодеры обгоняют sum-product, но плохо себя показывают на 10 и 15 итерациях. В то же время декодеры, построенные на SNR = 0.5 проигрывают на 5 итерациях и хорошо показывают себя на 15 итерациях.

Происходит данный эффект из-за того, что в какой-то момент в процессе построения LUT у подаваемых на вход распределений нарушается предположение о сортировке LLR-ов из-за того, что изначально вероятность попадания в отрезки заключена относительно $+1$, то есть правой стороны отрезка и имеет самую малую вероятность попадания в -1 . Затем во время работы алгоритма происходит концентрация около $+1$, а значит по симметрии и у -1 , в следствие чего сортировка может быть нарушена. Так у четырехбитного декодера, построенного на $SNR = 2.5$ сортировка нарушается на пятой итерации декодера, из-за чего можно наблюдать, как LUT начинают строиться неадекватным образом, а именно происходит упор лишь на два состояния, крайнее и ближайшее к 0, что изображено на 2. Видно, что LUT начинают строиться плохо, а потому если декодер не успел раскодировать сообщение за 5 итераций, то он может даже ухудшить результат, как видно по графикам, а не улучшить его. На $SNR = 0.5$ предположение нарушается сильно позже, потому что изначально шанс ошибки слишком большой и он не теряет, а потому он хоть и работает сначала хуже, но лишь улучшает свои результаты на первых 15 итерациях.

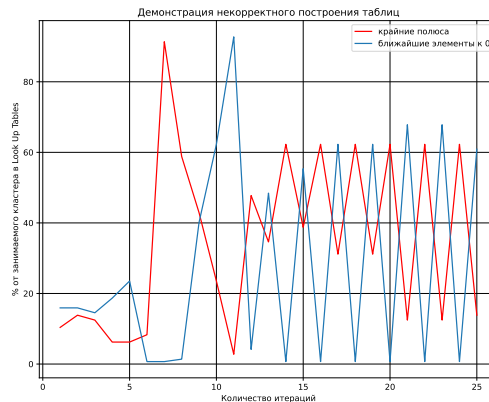


Рис. 2. График распределения размера кластеров.

Так как интересует поведения декодера лишь на конечном числе итераций и до определенного порога, то можно попробовать отсрочить момент, когда сортировка LLR нарушится. Для этого можно в кластеризации не учитывать элементы, для которых эволюция плотности показывает вероятность попадания в него ниже некоторого порога. Тогда можно кластеризовывать

лишь наиболее вероятные элементы за счет чего получается построить более качественные декодеры. Так как сортировка нарушалась лишь на $\text{SNR} = 2.5$ на первых 15 итерациях, то имеет смысл проводить оптимизацию лишь для нее, а остальные забивать к крайним значениям. Сравнение результатов изображено на рисунке 3.

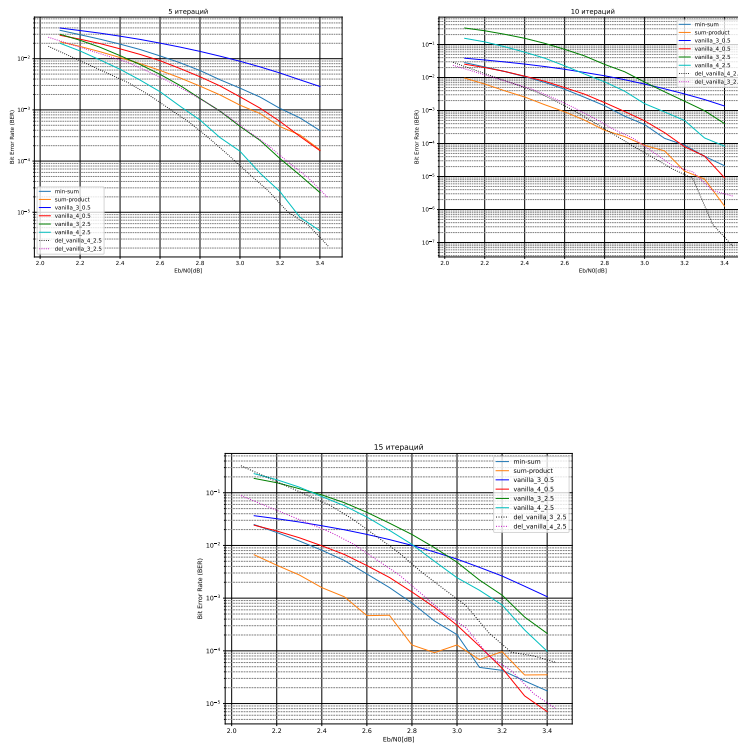


Рис. 3. Результат моделирования модернизированных методов квантования для MinLUT декодера с 5, 10 и 15 итерациями.

Видно, что на 5 итерациях различия практически нет, так как на данном количестве итераций LUT строятся еще корректно. На 10 итерациях виден заметный выигрыш, который получается за счет преимущества, описанного выше, но уже на 15 итерациях улучшенные декодеры начинают проигрывать построенным на $\text{SNR} = 0.5$. Так же замечено, что трехбитный декодер ведет себя лучше, чем четырехбитный. Связано это с тем, что чем больше

кластеров есть у элемента, тем больше в нем элементов участвует в сортировке и тем больше шанс, что один из элементов нарушит порядок. А значит при соблюдении данной оптимизации имеет смысл строить более жесткие декодеры, начиная с некоторого числа итераций. Таким образом удалось улучшить результаты и построить декодер, который на первых десяти итерациях выдает лучший результат из всех приведенных здесь грубоквантованных декодеров за счет проблемы, выявленной при построении таблиц.

Список литературы

1. Johnson S. J. Iterative error correction: Turbo, low-density parity-check and repeat-accumulate codes. – Cambridge university press, 2010.
2. Mohr P. et al. Coarsely Quantized Layered Decoding Using the Information Bottleneck Method //ICC 2021-IEEE International Conference on Communications. – IEEE, 2021. – С. 1-6.
3. Myung S., Yang K., Kim J. Quasi-cyclic LDPC codes for fast encoding //IEEE Transactions on Information Theory. – 2005. – Т. 51. – №. 8. – С. 2894-2901.
4. Kim S., Sobelman G. E., Lee H. A reduced-complexity architecture for LDPC layered decoding schemes //IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2010. – Т. 19. – №. 6. – С. 1099-1103.
5. Zhao J., Zarkeshvari F., Banihashemi A. H. On implementation of min-sum algorithm and its modifications for decoding low-density parity-check (LDPC) codes //IEEE transactions on communications. – 2005. – Т. 53. – №. 4. – С. 549-554.
6. Sarvepalli P. K., Klappenecker A., Rotteler M. Asymmetric quantum LDPC codes //2008 IEEE International Symposium on Information Theory. – IEEE, 2008. – С. 305-309.
7. Chen J., Fossorier M. P. C. Density evolution for two improved BP-based decoding algorithms of LDPC codes //IEEE communications letters. – 2002. – Т. 6. – №. 5. – С. 208-210.
8. Romero F. J. C., Kurkoski B. M. Decoding LDPC codes with mutual information-maximizing lookup tables //2015 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). – IEEE, 2015. – С. 426-430.
9. Yazdani R., Ardakani M. Waterfall performance analysis of finite-length LDPC codes on symmetric channels //IEEE transactions on communications. – 2009. – Т. 57. – №. 11. – С. 3183-3187.
10. Lewandowsky J., Bauch G. Information-optimum LDPC decoders based on the information bottleneck method //IEEE Access. – 2018. – Т. 6. – С. 4054-4071.
11. Kurkoski B. M., Yagi H. Quantization of binary-input discrete memoryless channels //IEEE Transactions on Information Theory. – 2014. – Т. 60. – №. 8. – С. 4544-4552.

Исследование авторегрессионных алгоритмов предсказания MIMO-канала в расширенных сценариях высокой мобильности*

Кирилл Глинский^{1,2}, Алексей Куреев^{1,2}, Артем Красилов^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

Аннотация В рамках требований, предъявляемых к системам сотовой связи пятого поколения, большое внимание уделено работоспособности сети в условиях высокой мобильности пользователей. В частности, высокая скорость движения пользователя приводит к быстрому устареванию информации о состоянии канала, и, как следствие, к значительному снижению производительности сети. Особенно остро данная проблема проявляется в случае использования большого числа антенн на передатчике. Для решения этой проблемы в литературе предлагаются ряд алгоритмов предсказания качества канала, в том числе, основанных на методах машинного обучения. Как правило, для анализа эффективности разработанных алгоритмов применяется имитационное моделирование с использованием упрощенных моделей канала, которые могут оказывать значительное влияние на получаемый результат. В работе проводится исследование эффективности авторегрессионного алгоритма предсказания канала в условиях высокой мобильности пользователя. В качестве моделей канала рассматриваются модели, описанные в спецификациях 3GPP, а также более детальную модель канала, реализованную в популярной среде имитационного моделирования Quadriga. Численные результаты показывают, что в зависимости от конфигурации параметров модели канала характерные интервалы времени, на которые алгоритм может предсказывать канал с высокой точностью, могут измениться более чем в 8 раз.

Keywords: Моделирование канала, 5G, авторегрессионные модели

1 Введение

Технология передачи данных с использованием большого числа антенн (англ. Massive Multiple Input Multiple Output, Massive MIMO), обеспечивает значительный рост производительности беспроводных сетей по таким показателям как пропускная способность и надежность доставки данных [1,2].

* Исследование выполнено в НИУ ВШЭ за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10158, <https://rscf.ru/project/21-79-10158/>

Для обеспечения высокой производительности сети при использовании технологии Massive MIMO на передатчике необходимо выбрать матрицу прекодера, отвечающую за распределение сигналов и их мощностей по антеннам. Как правило, прекодер выбирается для того, чтобы максимизировать соотношение сигнал-шум на приемнике, которое, в свою очередь, зависит от текущего состояния беспроводного канала [3]. Чтобы оценить текущее состояние канала, используются пилотные сигналы. В частности, в сетях 5G используются пилотные сигналы Sounding Reference Signal (SRS), передаваемые в восходящем канале от пользовательского устройства на базовую станцию. Чем чаще такие сигналы передаются, тем чаще базовая станция может перестраивать прекодер согласно актуальному состоянию канала, но и тем больше канальных ресурсов выделяется на передачу SRS, что приводит к уменьшению выделяемых для передачи данных канальных ресурсов.

Помимо этого, вследствие изменения канала со временем, информация о состоянии канала устаревает, и построенный на основе предыдущего знания о канале прекодер становится менее подходящим для изменившегося канала. Этот эффект, называемый устареванием прекодера (англ. precoder aging), приводит к значительному снижению соотношения сигнала к интерференции и шуму (англ. Signal to Interference and Noise ratio, SINR), особенно заметно в сценариях высокой мобильности.

Для решения описанной выше проблемы в литературе предлагаются различные алгоритмы предсказания канала. При использовании таких алгоритмов можно построить более точный прекодер для будущих передач. Хотя на данный момент предложено множество различных алгоритмов предсказания канала, остро стоит проблема сравнения и оценки производительности различных алгоритмов. В частности, экспериментальные измерения в сценариях Massive MIMO сложны и требуют дорогостоящего оборудования [4], а используемые имитационные модели или обладают чрезвычайно высокой для практического применения вычислительной сложностью [5], или вносят ряд упрощений [6], которые влияют на производительность исследуемых алгоритмов. Особенно заметными такие упрощения могут быть при использовании алгоритмов искусственного интеллекта, обучаемых на данных, полученных в ходе имитационного моделирования.

Более того, в существующих работах по предсказанию канала в сценариях высокой мобильности, как правило, мало внимания уделяется исследованию устойчивости алгоритмов предсказания канала к изменению канального окружения, а также адаптации алгоритма предсказания к таким изменениям.

В данной работе исследуется эффективность авторегрессионных алгоритмов предсказания канала в сценариях расширенной мобильности, т.е. сценариях, в рамках которых происходит в том числе и изменение канального окружения.

Работа построена следующим образом. Раздел 2 посвящен обзору литературы. Раздел 3 рассматривает основные подходы к моделированию канала. В разделе 4 описан исследуемый авторегрессионный алгоритм предсказания

канала. В разделе 5 содержатся численные результаты. Раздел 6 завершает работу.

2 Обзор литературы

На данный момент существует большое количество как предложенных алгоритмов предсказания канала, так и подходов по исследованию данных алгоритмов. Как правило, в рамках работ, исследование проводится либо с использованием среды имитационного моделирования, либо в различных экспериментах.

Так, работы [7,8] используют разработанные программно-аппаратные комплексы для исследования разработанных алгоритмов предсказания канала. Тем не менее, помимо сложностей с воспроизводимостью экспериментов, эти работы были ограничены или в мобильности такой установки, или в возможности поддержки большого числа антенн ввиду аппаратных ограничений. В связи с этим, важную роль для разработки алгоритмов предсказания канала играют имитационные модели, применяемые в основном при разработке алгоритмов предсказания канала, к примеру в работах [9,10,11]. Хотя при моделировании использовались стандартизованные в рамках 3GPP модели канала, ряд параметров моделей не были зафиксированы, такие как длина пространственной когерентности. Заметим, что сопоставление популярных моделей канала уже производилось [5,12,13], результаты этих работ не позволяют напрямую оценить применимость той или иной модели канала для задачи исследования алгоритмов предсказания канала.

Ряд работ показывает [14,15,16], что в зависимости от выбранной модели канала, эффективность работы алгоритма может меняться значительно. Особенно склонными к такому поведению являются подходы к предсказанию канала на основе машинного обучения, а также на основе параметрического разложения канала. В рамках этой серии работ показано, что в зависимости от распределения частотного спектра канала, качество алгоритма предсказания канала на основе разложения канала способно существенно различаться от сценария к сценарию. Так, при использовании модели Джейкса в качестве модели канала алгоритм способен обеспечить высокую точность предсказания, но при использовании более реалистичной модели канала, качество оценки канала сравнимо с методами, не использующими предсказание в принципе.

В связи с этим, крайне актуальной является задача исследования алгоритмов предсказания канала в более широком спектре канальных условий, в том числе и в различных конфигурациях имитационных моделей. Так, необходимо учитывать эффекты изменения окружения в процессе движения пользователя, для того чтобы оценить время устаревания модели предсказания канала, а также общую применимость предлагаемого алгоритма.

3 Моделирование ММО-канала

3.1 Основные подходы к моделированию канала

Для моделирования физического уровня беспроводных сетей, в частности для моделирования ММО-каналов необходима модель канала, которая бы учитывала различные аспекты реалистичного распространения сигнала. С другой стороны, при разработке модели канала необходимо принимать во внимание ограниченность вычислительных ресурсов. На данный момент основным подходом для моделирования канала является подход на основе геометрического моделирования многолучевого распространения электромагнитных волн.

При использовании данного подхода, отправленный передатчиком сигнал достигает приемника по нескольким путям. Каждый путь i соответствует траектории электромагнитного сигнала (луча) i . При распространении сигнал ослабляется, меняет фазу из-за взаимодействия с объектами среды. Также, достигая приемника с определенного направления, усиливается исходя из диаграммы направленности антенн приемника. Действие этих факторов учитывается умножением сигнала на комплексный коэффициент a_i . Время распространения сигнала вдоль траектории луча i проявляется в том, что он достигает приемника с задержкой τ_i .

Важной частью процедуры моделирования канала является подбор параметров лучей, а также их количества. Наиболее трудоемким и приближенным к реальному поведению электромагнитных волн является способ на основе трассировки лучей (англ. Ray-Tracing Cluster Model, RTCM). В таком случае явно моделируется распространение лучей в пространстве с различными препятствиями. Такой подход является крайне вычислительно затратным, но и наиболее реалистичным.

С другой стороны при использовании стохастического подхода (англ. Geometric-based Stochastic Cluster Model), где вместо расчета взаимодействия конкретных лучей с физическими объектами, каждому пути распространения луча случайным образом назначаются мощность, задержка, трехмерные углы излучения и поглощения. Параметры этих случайных распределений подбираются таким образом, чтобы приблизить совокупное распределение параметров канала к полученным в ходе эксперимента данным. Как правило, для моделирования протяженных объектов, некоторое количество лучей со схожими пространственными характеристиками объединяется в кластер, откуда и берется название модели. Лучи в кластере имеют одинаковую задержку распространения.

Схема распространения сигнала от передатчика к приемнику представлена на рис. 1. Сигнал для каждого луча излучается передатчиком в направлении рассеивателя первого взаимодействия (First Body Scatterer, FBS), после чего он распространяется в направлении рассеивателя последнего взаимодействия (Last Body Scatterer, LBS)

В связи с значительно меньшим потреблением вычислительных ресурсов, подходы на основе GSCM являются более популярными, особенно при

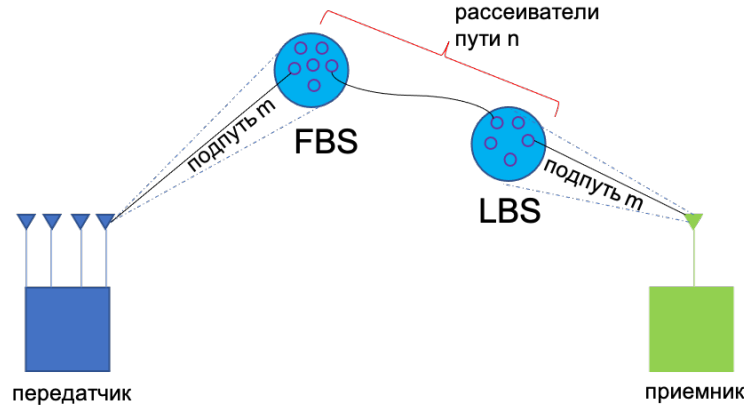


Рис. 1: Схема распространения сигнала от передатчика к приемнику в GSCM.

проведении моделирования системного уровня. Широко используются библиотеки, в которых реализован функционал GSCM, такие как Quadriga[17], 5G Toolbox, NYUSIM[13].

3.2 Учет мобильности пользователя

Для того, чтобы моделировать движение пользователя и временную эволюцию канала, в GSCM используется несколько способов, как включающие в себя как модификацию параметров кластеров, так и сохраняющие параметры распространения. К методам учета временной эволюции относятся.

1. Допплеровское затухание (англ. Doppler Fading). При моделировании доплеровского затухания каждый кластер обладает некоторой относительной скоростью, которая может отображать либо собственное движение пользователя, либо некоторое усредненное движение окружения. Таким образом, сигнал от каждого кластера будет сдвинут на частоту f_d , выражаемой следующим образом:

$$f_d = f_c \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{V}}{c}, \quad (1)$$

где f_c обозначает несущую частоту, \mathbf{r} — единичный радиус-вектор, направленный в сторону от приемника до рассеивателя, c — скорость света, а \mathbf{V} выражает скорость движения приемника. Например при $f_c = 3.6$ ГГц и скорости движения приемника 15 км/ч доплеровская частота не превышает 100 Гц. Эта частота много меньше характерной ширины полосы в несколько десятков МГц, используемой в технологии 5G. По этой причине эффект Доплера проявляется в качестве зависящей от времени фазовой поправки к каждому из лучей. Отметим, что при этом собственные параметры луча не меняются.

2. Дрейф кластеров (англ. Drifting). Дрейф кластеров выражается в изменении геометрических параметров кластера из-за движения пользователя, что позволяет получать непрерывное изменение свойств канала. В частности, меняются азимутальные и зенитные углы луча, а также набег фазы. Такой механизм моделирования изменения канала, аналогично с доплеровским затуханием внесен в стандарт 3GPP [18].
3. Интерполяция кластеров между сегментами (англ. Cluster Interpolation). Более современные модели канала, выходящие за рамки стандартов 3GPP, используют разделение пути пользователя на ряд сегментов, чтобы моделировать более сложные сценарии, такие как включение и исключение прямого луча в ходе движения пользователя. При этом длина одного сегмента определяется сценарием и обычно составляет десятки метров. Чтобы обеспечить непрерывность временной эволюции канала, модель канала интерполирует значения параметров кластеров при движении от одного сегмента к другому.
4. Процесс рождения-гибели кластеров (англ. Cluster Birth-Death Process). В данном случае объединение сегментов осуществляется за счет рождения и гибели кластеров. Такой подход позволяет обеспечить непрерывность и гладкость временной характеристики канала при объединении тех сегментов, где отличается не только параметризация кластеров, но и их количество (например, при переходе из сценария с прямой видимостью в сценарий с непрямой). В рамках данного процесса, в каждый отдельный момент времени может произойти событие рождения (т.е. добавления в набор кластеров нового кластера со своими параметрами) или смерти (т.е. исчезновения кластера). Вероятности событий рождения и смерти подбираются таким образом, чтобы за перемещение сегмента все кластеры бы переродились из одного распределения в другое.

4 Исследуемый алгоритм

Беспроводной канал между базовой станцией и пользовательским устройством в момент времени t представлен комплексной матрицей $H(t)$. Матрица каналов имеет размер $N_{UE} \times N_{gNB}$, где N_{gNB} и N_{UE} – количество антенн на базовой станции и пользователе соответственно. Для упрощения описания в этой работе рассматриваются сценарии с одной антенной на пользователе.

Учитывая текущее состояние канала во времени, можно выбрать такой прекодер, который максимизирует SINR (англ. Maximum Ratio Precoding, MRC). Прекодер, обозначаемый P вычисляется следующим образом:

$$P = \frac{H^H(t)}{\|H(t)\|} \sqrt{S},$$

где t – текущий момент времени, $H^H(t)$ – эрмитова сопряженная матрица $H(t)$, $\|H(t)\|$ – норма Фробениуса матрицы $H(t)$, а S – диагональная матрица управления мощностью, причем в одноантенном случае S – это единичный скаляр.

Классическая авторегрессионная модель порядка K предсказывает следующее значение y_i временного ряда y_t по следующей формуле:

$$y_t = c + \sum_{k=1}^K \varphi_i y_{t-k} + \varepsilon_t, \quad (2)$$

где c — постоянное смещение модели, φ_i — коэффициент авторегрессии для каждого предыдущего временного шага i , а ε_t — величина, описывающая ошибку модели.

Для классической авторегрессионной модели временной шаг будет равен периоду SRS, который определяет скорость поступления новых измерений канала. В рассматриваемом в данной работе [11] алгоритме используется модель векторной авторегрессии (англ. vector autoregressive model, vector AR), где целевыми переменными являются значения канала в промежуточные моменты между передачами SRS, а коэффициенты для каждой переменной выбираются независимо. Такая модель предсказывает набор переменных X где x_j — j -ая переменная в векторе переменных для предсказания, а $\varphi_{i,j}$ — коэффициент авторегрессии для этой переменной согласно формуле (3). Чтобы обучить модель на данных с высокой гранулярностью, необходимо использовать отдельную фазу обучения, которая охватывает один или несколько периодов SRS, где намного чаще запрашивается информация о состоянии канала для создания обучающей выборки и дальнейшего подбора параметров модели.

$$x_j(t) = c_j + \sum_{k=1}^K \varphi_{i,j} y_{t-k} + \varepsilon \quad (3)$$

Обучение модели осуществляется за счет использования стандартного метода наименьших квадратов. При этом, обучающая выборка объединяется по всем антенным парам приемник-передатчик, а также по частотам.

5 Численные результаты

Перейдем к рассмотрению численных результатов исследования эффективности алгоритмов предсказания канала, полученных при использовании имитационной модели канала с различными способами моделирования мобильности. Рассматривается передача данных между пользователем и базовой станцией в сценарии 3GPP Urban Macro, при которой пользователь удаляется от базовой станции по прямой со скоростью 30 км/ч. Начальное расстояние до базовой станции — 100 м. Пользовательское устройство оснащено одной всенаправленной антенной, а антенный массив на базовой станции состоит из 32 пар кросс-поляризованных антенн. Ширина полосы составляет 25 МГц, что равно 16 группам прекодеров, т.е. групп поднесущих, для которых строится общий прекодер.

В рамках исследования проводилось сравнение точности прогнозирования канала при использовании алгоритмов предсказания канала. В качестве

метрики для сравнения был выбран SINR на пользовательском устройстве. В качестве алгоритмов для сравнения были выбран следующий набор.

1. Алгоритм, использующий последнее известное состояние канала, называемый далее **LastSRS**. Период пилотных сигналов был выбран равным 5 мс.
2. Описанный в рамках [11] и раздела 4 авторегрессионный алгоритм, обозначенный далее **PABAFT**. Обучающая выборка для алгоритма собиралась за один кадр и составляла $16 \times 64 = 1024$ примеров. В свою очередь, порядок модели был равен $K = 30$, что означает, что пилоты SRS записывались в течение 150 миллисекунд.

В свою очередь, для исследования алгоритмов предсказания при изменении свойств модели канала Quadriga GSCM были выбраны следующие конфигурации вышеупомянутой модели.

1. Модель с замороженными параметрами кластеров и одним лучом на кластер, обозначаемая в работе[5] как Partial Doppler. В данной конфигурации временная эволюция канала происходит исключительно за счет доплеровских затуханий, причем доплеровские частоты кластеров неизменны
2. Модель, соответствующая 3GPP[18], т.е. включающая в себя дрейф кластеров и множество лучей на кластер, но не интерполирующая параметры кластеров.
3. Модель, использующая реализованный в QuadRiGa процесс интерполяции кластеров. В рамках исследования поведения канала в условиях интерполяции кластеров было выбрано две различные длины сегментов — 20 м, что соответствует величине, определенной авторами модели канала в ходе экспериментальных исследований, и 10 м, что означает в два раза большую скорость интерполяции кластеров.

Для каждого сценария проводилось исследование зависимости распределения отличия SINR от достижимого с использованием идеального предсказания канала, в зависимости от времени между последовательными сборами обучающей выборки и обучениями моделей на новых выборках. Поскольку сбор выборки для обучения модели занимает один кадр, равный по длительности 5 мс, то минимальный период переобучения модели, при котором применение такого метода имеет смысл - 10 миллисекунд. При этом, накладные расходы с точки зрения нисходящего канала составят величину, равную $1/(T - 1)$, где T - период между обучениями модели в кадрах.

5.1 Сценарий Partial Doppler

Поскольку в данном сценарии все параметры модели канала неизменны, из чего следует стационарность процесса, описывающего временную эволюцию канала, то результаты, показывающие независимость точности предсказания от времени между переобучением модели на рис. 2, согласуются с

предположением, что статические параметры кластеров приводят к отсутствию устаревания модели.

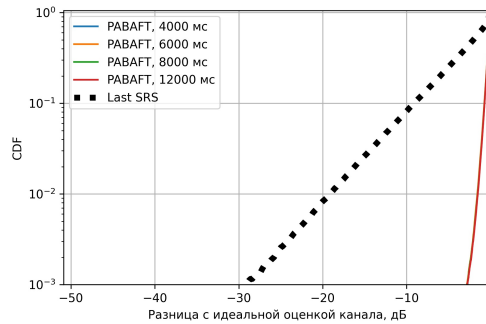


Рис. 2: Сравнение различных алгоритмов предсказания в сценарии *Partial Doppler*.

Более того, в силу стационарности процесса, точность предсказания также велика, и позволяет значительно превзойти алгоритм Last SRS, обеспечивая выигрыш до 20 дБ.

5.2 Разработанная 3GPP модель канала

В данной модели реализован дрейф кластеров. Это означает, что параметры кластеров будут изменяться, внося свой вклад в вариативность канала. Результаты приведены на рис. 3. Как видно, по мере уменьшения периода между обучением модели, качество предсказания также возрастает. Более того, видно, что между 200 и 400 миллисекундами качество предсказания деградирует настолько, что модель показывает результат хуже чем подход Last SRS. Такой переход обусловлен тем, что при смене позиции на несколько метров, частоты доплеровских затуханий отдельных кластеров могут измениться достаточно, чтобы векторная авторегрессионная модель потеряла в качестве предсказания.

В силу этих причин, выигрыш по сравнению с алгоритмом Last SRS снижается при редком обучении модели, то есть при таких, в которых доля, приходящаяся на кадры с пилотными сигналами не превосходит 2%.

5.3 Модель с интерполяцией кластеров

В данной модели канала добавлена интерполяция кластеров в рамках перехода между сегментами, каждый из которых имеет свой набор кластеров. Результаты приведены на рис. 4б.

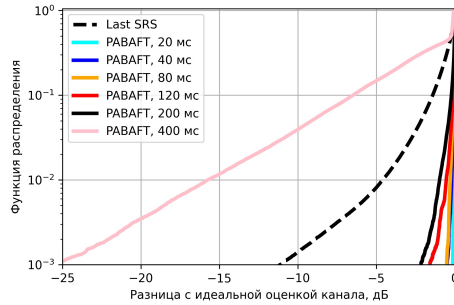
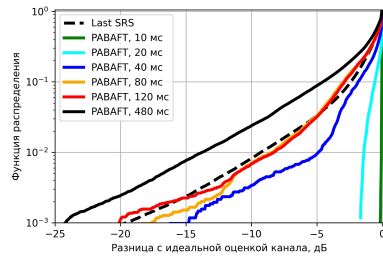
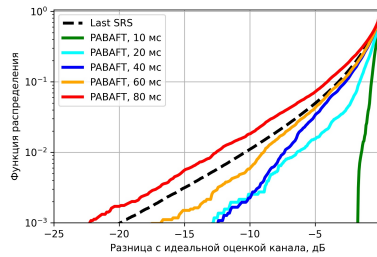


Рис. 3: Сравнение различных алгоритмов предсказания в сценарии дрейфа кластеров.

Аналогично ранее рассмотренным сценариям дополнительно к доплеровскому затуханию, изменение параметров кластеров приводит к значительно более быстрому устареванию векторной авторегрессионной модели. Видно, что достаточно 200 миллисекунд суммарного изменения параметров канала (в ходе сбора данных и применения модели), чтобы точность предсказания стала схожей с Last SRS. Более того, лишь в течение десяти миллисекунд точность алгоритма можно назвать сопоставимой с таковой в сценарии Partial Doppler.



(а) Сравнение при длине сегмента 20 м.



(б) Сравнение при длине сегмента 10 м.

Рис. 4: Сравнение алгоритмов предсказания канала в сценарии с интерполяцией кластеров

Чтобы уточнить влияние интерполяции сегментов на время устаревания модели, в рамках дополнительного сценария длина сегмента была увеличена в два раза. Результаты для модифицированного эксперимента представлены на рис. 4а. Видно, что период устаревания также возрос – кривая 10 мс

для первого сценария схожа с кривой 20 мс во втором сценарии, аналогично для кривых 40 и 80 мс соответственно. Таким образом, можно заключить, что ключевой эффект оказывающий влияние на изменение характеристик канала и эффективность алгоритмов предсказания – эффект изменения параметров кластеров вследствие интерполяции и рождения/гибели кластеров.

6 Заключение

В рамках данной работы была исследована производительность авторегрессионного алгоритма предсказания ММО-канала в различных расширенных сценариях мобильности, поддерживаемых современными моделями канала. Показано, что в зависимости от конфигурации сценария и используемой модели канала характерные интервалы времени, на которые алгоритм может предсказывать канал с высокой точностью, могут измениться более чем в 8 раз. Также показано, что ключевой эффект оказывающий влияние на изменение характеристик канала и эффективность алгоритмов предсказания – эффект изменения параметров кластеров вследствие интерполяции и рождения/гибели кластеров, который учитывается не во всех моделях канала.

В рамках дальнейшей работы будет произведено исследование и сравнение между собой более широкого спектра алгоритмов предсказания канала, не ограничиваясь авторегрессионными подходами. Также исследование будет дополнено исследованием различных конфигураций моделей канала, в том числе с рождением-гибелью кластеров.

Список литературы

1. N. H. M. Adnan, I. M. Rafiqul, and A. Z. Alam, “Massive MIMO for fifth generation (5g): Opportunities and challenges,” in *2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE)*, pp. 47–52, IEEE, jul 2016.
2. W. Wang, W. Liang, B. Li, L. Gu, J. Sheng, P. Qiu, J. Wang, and Y. Wang, “Field trial on TDD massive MIMO system with polar code,” in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–6, IEEE, oct 2017.
3. 3GPP, “Evolved universal terrestrial radio access (e-utra),” 2 2013. V10.7.0.
4. S. Malkowsky, J. Vieira, L. Liu, P. Harris, K. Nieman, N. Kundargi, I. C. Wong, F. Tufvesson, V. Owall, and O. Edfors, “The world’s first real-time testbed for massive MIMO: Design, implementation, and validation,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 9073–9088, 2017.
5. E. Endovitskiy, A. Kureev, and E. Khorov, “Reducing computational complexity for the 3gpp TR 38.901 MIMO channel model,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, pp. 1133–1136, jun 2022.
6. H. Asplund, J. Medbo, B. Goransson, J. Karlsson, and J. Skold, “A simplified approach to applying the 3gpp spatial channel model,” in *2006 IEEE 17th*

- International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, IEEE, sep 2006.
7. K. Glinskiy, A. Kureev, and E. Khorov, "SDR-based testbed for real-time CQI prediction for URLLC," in *IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pp. 1–2, IEEE, may 2021.
 8. C. Luo, J. Ji, Q. Wang, X. Chen, and P. Li, "Channel state information prediction for 5g wireless communications: A deep learning approach," *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 7, pp. 227–236, jan 2020.
 9. A. Belogaev, E. Khorov, A. Krasilov, D. Shmelkin, and S. Tang, "Conservative link adaptation for ultra reliable low latency communications," in *2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pp. 1–5, IEEE, jun 2019.
 10. T. E. Bogale, X. Wang, and L. B. Le, "Adaptive channel prediction, beamforming and scheduling design for 5g v2i network: Analytical and machine learning approaches," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, pp. 5055–5067, may 2020.
 11. K. Glinskiy, A. Kureev, A. Krasilov, and E. Khorov, "Pabaft: Channel prediction approach based on autoregression and flexible tdd for 5g systems," *Electronics*, vol. 11, no. 12, 2022.
 12. L. PANG, J. ZHANG, Y. ZHANG, X. HUANG, Y. CHEN, and J. LI, "Investigation and comparison of 5g channel models: From quadriga, nyusim, and mg5g perspectives," *Chinese Journal of Electronics*, vol. 31, no. 1, pp. 1–17, 2022.
 13. T. S. Rappaport, S. Sun, and M. Shafi, "Investigation and comparison of 3gpp and NYUSIM channel models for 5g wireless communications," in *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, IEEE, sep 2017.
 14. J. Vanderpypen and L. Schumacher, "MIMO channel prediction using ESPRIT based techniques," in *2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1–5, IEEE, 2007.
 15. H. Yin, H. Wang, Y. Liu, and D. Gesbert, "Addressing the curse of mobility in massive MIMO with prony-based angular-delay domain channel predictions," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, pp. 2903–2917, dec 2020.
 16. C. Wu, X. Yi, Y. Zhu, W. Wang, L. You, and X. Gao, "Channel prediction in high-mobility massive MIMO: From spatio-temporal autoregression to deep learning," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, pp. 1915–1930, jul 2021.
 17. F. Burkhardt, S. Jaeckel, E. Eberlein, and R. Prieto-Cerdeira, "QuaDRiGa: A MIMO channel model for land mobile satellite," in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, pp. 1274–1278, IEEE, apr 2014.
 18. 3GPP, "Tr38.901: Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 ghz," 2022.

Анализ эффективности использования методов доступа к каналу с прослушиванием несущей в сетях NB-Fi

И.Д. Павлова^{1,2}, Д.В. Банков¹, А.И. Ляхов¹, Е.М. Хоров¹

{pavlova, bankov, lyakhov, khorov}@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Аннотация Протокол NB-Fi является перспективным решением для реализации энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия и был принят в 2022 г. в качестве национального стандарта Российской Федерации. Устройства NB-Fi передают данные в нелицензируемых диапазонах радиочастот и могут работать в двух режимах. По умолчанию устройства работают в режиме, при котором доступ к каналу перед передачей получается без прослушивания несущей, однако стандарт NB-Fi позволяет устройствам работать в режиме с прослушиванием несущей. В данной работе сравнивается энергопотребление устройств в сетях NB-Fi, в которых устройства работают в режиме без прослушивания несущей и с прослушиванием несущей при различных способах реализации прослушивания. Показано, что даже при невысокой интенсивности трафика (от 30 пакетов в секунду) и неполной слышимости устройств в сети, работа устройств в режиме с прослушиванием несущей позволяет значительно снизить энергопотребление устройств в сравнении с режимом без прослушивания несущей.

Keywords: NB-Fi, LPWAN, Listen Before Talk, метод доступа к каналу с прослушиванием несущей

1 Введение

Интернет вещей с каждым годом становится всё большей частью от всего Интернета. Важной составляющей Интернета вещей являются энергоэффективные сети дальнего радиуса действия (англ.: Low Power Wide Area Network, LPWAN), которые, согласно прогнозам, к 2023 г. будут обслуживать 14% всех Интернет-соединений [1]. Из множества технологий LPWAN следует выделить технологию NB-Fi [2, 3], принятую в качестве национального стандарта Российской Федерации. Предполагается массовое внедрение

стандарта NB-Fi в России в системы Интернета вещей, используемые для мониторинга экологической ситуации, сбора данных для ЖКХ, городского планирования и управления инфраструктурой. Для эффективного использования данной технологии и выполнения требований к качеству обслуживания пользователей в различных сценариях необходимо знать пределы работы и возможности этого протокола.

Сети NB-Fi работают в нелицензируемых диапазонах частот, в связи с чем на процедуру доступа устройств NB-Fi к каналу накладывается ряд ограничений в зависимости от режима работы устройств. Устройства NB-Fi по умолчанию работают в режиме без прослушивания канала. Работа устройств в таком режиме проста в реализации, однако устройства должны соблюдать ограничения на рабочий цикл устройств — долю занимаемого канального времени. Также устройства NB-Fi могут работать в режиме с прослушиванием канала перед передачей (англ.: Listen Before Talk, LBT). Второй режим сложнее в реализации, но, как показывают классические исследования методов множественного доступа с прослушиванием несущей (англ.: Carrier Sense Multiple Access, CSMA) [4], более эффективен с точки зрения вероятности доставки данных. В то же время прослушивание канала перед передачей вносит дополнительные расходы энергии, в то время как энергопотребление устройств является одним из ключевых показателей эффективности для сетей LPWAN.

На данный момент в литературе имеются лишь обзорные исследования протокола NB-Fi, в которых рассматривается только режим работы без прослушивания несущей [3, 5, 6]. При этом, отсутствуют исследования энергопотребления устройств в сетях NB-Fi и исследования режима LBT в сетях NB-Fi. Имеются работы, в которых для сетей других технологий сравниваются методы доступа к каналу без прослушивания несущей (Aloha) и CSMA [4, 7–9], однако в данных работах не сравнивается энергопотребление устройств и не учитываются особенности сетей NB-Fi, связанные с доступом устройств к каналу и возможностью передачи данных с разной скоростью. Сравнение энергопотребления устройств в режиме Aloha и «ненастойчивый CSMA» проводится в работах [10, 11] для сетей LoRaWAN. В [11] показано, что режим CSMA достигает большей вероятности доставки пакета, чем режим Aloha, но при этом имеет большее энергопотребление. Как показано в [10], данный результат справедлив только для слабнонагруженной сети, в то время как в сети, состоящей из большого числа устройств, CSMA позволяет снизить энергопотребление устройств. В то же время, в [10] не исследуются другие разновидности CSMA и не дается ответ на вопрос, какой тип CSMA окажется более эффективным. В данной работе при помощи имитационного моделирования сравнивается энергопотребление устройств NB-Fi при использовании доступа к каналу без прослушивания несущей и при использовании различных разновидностей CSMA.

Полученные результаты показали, что при высокой интенсивности трафика в сети (более 30 пакетов в секунду), использование методов доступа с прослушиванием несущей позволяет снизить энергопотребление устройств на

20% и более. В сценариях, когда все устройства находятся в области видимости друг друга, наименьшее энергопотребление достигается при использовании ненастойчивого CSMA, а в сценариях, когда не все устройства могут детектировать передачи других устройств, наименьшее энергопотребление достигается при использовании р-настойчивого CSMA.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приведено описание протокола NB-Fi. В разделе 3 описываются исследуемые методы доступа к каналу с прослушиванием несущей перед передачей. В разделе 4 описывается исследуемый сценарий работы сети NB-Fi и приводится постановка задачи. Численные результаты исследования приведены в разделе 5. Заключение работы содержится в разделе 6.

2 Описание протокола NB-Fi

Сети NB-Fi работают в нелицензируемом диапазоне частот, поэтому накладываются ограничения на максимальную излучаемую мощность устройств. В диапазоне частот 868,7–869,2 МГц ограничение составляет 100 мВт.

Сеть NB-Fi использует топологию «звезда» и состоит из сервера, базовых станций и оконечных устройств (далее называемых *сенсорами*). Сервер обменивается информацией с базовыми станциями через проводное соединение. Сенсоры обмениваются данными с базовой станцией по протоколу NB-Fi.

2.1 Модуляция

В сетях NB-Fi для передачи пакетов в восходящем (англ.: UPLINK) и нисходящем направлениях (англ.: DOWNLINK) используется относительная двоичная фазовая манипуляция несущей. В нисходящем направлении также может быть использована двоичная фазовая манипуляция несущей.

Для передачи данных устройства могут использовать скорости передачи в 50, 400, 3200 и 25600 бит/с, от которых зависит, какой диапазон частот займет передача и как долго она продлится: чем больше скорость, тем «шире» пакет по частоте и «короче» по времени. В сетях NB-Fi кадры в восходящем и нисходящем потоке имеют одинаковый размер 288 бит, из которых полезная нагрузка составляет до 64 бит. Длительность кадров T_{Frame} на разных скоростях приведена в табл. 1.

2.2 Режимы работы

Сенсоры могут работать в двух режимах: без прослушивания несущей перед передачей (далее Aloha) и с прослушиванием несущей. В первом режиме сенсор не прослушивает канал перед передачей и сразу передаёт пакет, если он передается впервые, или после случайной отсрочки, если передается повторно. При включении второго режима сенсор, прежде чем отправить

пакет, должен оценить уровень сигнала в полосе частот, в которой предполагается отправка данных, чтобы убедиться в отсутствии передачи другими устройствами. Если не обнаружена передача другими сенсорами, происходит передача пакета. В противном случае сенсор не должен выполнять передачу до тех пор, пока уровень сигнала в данной полосе частот не упадет ниже установленного значения.

2.3 Метод доступа к каналу

В стандарте наложено ограничение на минимальную ширину полосы рабочих частот передачи в нисходящем потоке — 102,4 кГц и в восходящем потоке — 51,2 кГц. В данной работе рассматриваются сети, использующие наименьшие полосы частот.

В восходящем потоке выделенный частотный диапазон характеризуется базовой частотой передачи UPLINK-пакетов B_{ul} . Внутри этого диапазона сенсорам может задаваться некоторое константное смещение относительно базовой частоты O_{ul} , благодаря которому разные поддиапазоны частот могут выделяться разным группам сенсоров. Внутри своего поддиапазона каждый сенсор ещё имеет некоторое псевдослучайное смещение частоты C_{ul} . В результате, частота отправки UPLINK-пакетов вычисляется по формуле

$$F_{ul} = \begin{cases} B_{ul} + O_{ul} + C_{ul}, & \text{если порядковый номер пакета четный,} \\ B_{ul} + O_{ul} - C_{ul}, & \text{если порядковый номер пакета нечетный.} \end{cases} \quad (1)$$

Псевдослучайное смещение несущей частоты C_{ul} зависит от содержимого передаваемого пакета и вычисляется как

$$C_{ul} = \frac{((I + M) \bmod 256) \times G_{ul}}{255}, \quad (2)$$

где I — идентификатор устройства, M — имитовставка пакета, G_{ul} — полоса перестройки несущей частоты передачи UPLINK-пакетов,

$$G_{ul} = \begin{cases} \frac{W_{ul} - r \times 2 - 2000}{2}, & \text{если } W_{ul} > r \times 2 + 2000, \\ 0, & \text{если } W_{ul} \leq r \times 2 + 2000, \end{cases} \quad (3)$$

где W_{ul} — ширина рабочей полосы частот, r — скорость передачи UPLINK-пакетов, измеряемая в битах в секунду (см. табл. 1). Далее в работе рассматривается работа сети с параметрами $O_{ul} = 0$ и $W_{ul} = 51200$.

В нисходящем направлении центральная частота для каждого сенсора выбирается один раз аналогично тому, как это делается для UPLINK-пакетов, но не зависит от имитовставки M .

2.4 Механизм подтверждения доставки пакета и повторной отправки

Устройства NB-Fi могут работать в режиме без подтверждений и с подтверждениями, причём подтверждения могут отправляться на группу из 2^n кадров, $n = 0, \dots, 5$. При использовании механизма группового подтверждения,

Таблица 1: Временные константы

Скорость передачи r , бит/с	T_{Frame} , мс	T_{delay} , мс	T_{listen} , мс	T_{rnd} , мс
50	5760	5900	60000	5000
400	720	740	30000	1000
3200	90	95	6000	100
25600	11,25	15	6000	100

сенсор, отправляя последний кадр из группы, ставит флаг, сигнализирующий о необходимости базовой станции послать подтверждающий кадр, в котором содержится информация о недоставленных кадрах в группе. Через интервал времени T_{delay} (см. табл. 1) после начала передачи пакета, в ответ на который должен прийти кадр подтверждения, сенсор начинает прослушивать нисходящий канал и в течение интервала времени T_{listen} ждёт подтверждение. В случае групповой отправки, кадр подтверждения содержит битовую маску, в которой указывается, какие кадры были получены. При получении подтверждения, сенсор повторно отправляет недоставленные кадры из группы. Если сенсор не получает подтверждение по истечении T_{listen} , он повторяет отправку последнего кадра через случайное время, распределённое равномерно в интервале $(0, T_{rnd})$ (см. табл. 1). Повторные передачи осуществляются до получения подтверждения всех отправленных кадров или до достижения ограничения на максимальное количество повторных передач (настраиваемый параметр).

3 Способы реализации доступа к каналу с прослушиванием несущей

Доступ к каналу в режиме LBT может быть организован различными способами, которые соответствуют различным разновидностям множественного доступа к каналу с прослушиванием несущей (англ.: Carrier Sense Multiple Access, CSMA). В данной работе рассматриваются режимы работы ненастойчивого и р-настойчивого CSMA.

Сенсор в режиме *ненастойчивого CSMA* выбирает центральную частоту при поступлении пакета согласно уравнению (1). В течение некоторого промежутка времени сенсор прослушивает канал, который собирается занять. Если канал свободен, то есть уровень сигнала в полосе частот ниже порогового значения, то сразу после прослушивания сенсор начинает передавать пакет. Если канал занят, сенсор снова прослушивает канал спустя случайную отсрочку и повторяет этот алгоритм до тех пор, пока канал не освободится. В данной работе случайная отсрочка выбирается равномерно в интервале $[0, T_{Frame}]$, где T_{Frame} — длительность кадра на используемой сенсором скорости передачи.

Также рассмотрен режим *ненастойчивого CSMA* с переносом частоты, алгоритм которого состоит в том, что после прослушивания среды в случае,

Таблица 2: Параметры сценария

Скорость передачи, бит/с	S дБм	R_{sensor} , м	R_{base} , м
50	-150	4270	12150
400	-141	2460	7650
3200	-132	1420	4810
25600	-123	820	3030

если канал занят, сенсор начнет прослушивать канал на другой частоте, выбранной согласно уравнениям (1)–(3) с одним отличием: вместо имитовставки пакета M используется случайное целое число, выбираемое равновероятно на интервале $[0, 255]$. Таким образом, первый раз центральная частота передачи выбирается в соответствии со стандартным алгоритмом выбора частоты в восходящем направлении, а при повторных прослушиваниях — равновероятно из доступного на используемой скорости передачи интервала.

В режиме p -настойчивого CSMA сенсор сразу приступает к передаче пакета, если канал свободен. Если канал занят, то сенсор с вероятностью p передает пакет, как только канал освободится, иначе ждет следующего слота, чтобы заново начать прослушивание. Заметим, что описание процедуры LBT в стандарте NB-Fi наиболее соответствует p -настойчивому CSMA с параметром $p = 1$, также называемому настойчивым CSMA.

4 Исследуемый сценарий и постановка задачи

Рассмотрим сеть, состоящую из сервера, 1000 сенсоров и базовой станции. Для передач сенсоров в восходящем потоке используется частотный диапазон шириной 51,2 кГц, а для передач в нисходящем потоке используется частотный диапазон шириной 102,4 кГц. При этом выделенный диапазоны для передачи в восходящем потоке используются сенсорами целиком без разделения на поддиапазоны. Базовая станция находится в центре круга радиуса R , а сенсоры распределены в этом круге равномерно. Сенсоры генерируют пакеты, которые передают базовой станции. Время генерации пакетов описывается потоком Пуассона с интенсивностью λ . Скорости передачи данных назначаются при инициализации устройств и одинаковы для восходящего и нисходящего направлений. Подтверждение отправляется на каждый пакет. Максимальное число попыток отправки пакета равно семи. Если по истечении всех попыток пакет не был доставлен, то он считается потерянным. На устройствах присутствует буфер, вмещающий один пакет. Новый пакет при генерации помещается в буфер. В случае, если буфер не был пустой, новый пакет вытесняет старый, который считается потерянным. Длина всех пакетов равна 288 битам.

Таблица 3: Потребляемая сенсором мощность [10]

P_{tx} , мВт	P_{rx} , мВт	P_{sense} , мВт
419,6	44,06	4,32

Для вычисления затухания мощности сигналов от сенсоров до базовой станции используется модель Окамуры-Хаты [12], а от сенсоров к сенсорам — модель из статьи [13]. Разные модели распространения используются из-за того, что предполагается, что сенсоры находятся на одинаковой высоте, а базовая станция находится на возвышении 30 м относительно сенсоров. Минимальное соотношение сигнал-шум для успешной передачи равно 7 дБ (учитывая входной коэффициент шума базовой станции, равный 2 дБ, и отношение сигнал/шум, равное 5 дБ, которое соответствует вероятности битовой ошибки 10^{-5}). Если соотношение полезного сигнала к помехам, вызванным тепловым шумом и передачами других устройств, меньше этого значения, то пакет считается поврежденным. Предельная чувствительность приема S , максимальное расстояние R_{base} , на котором базовая станция может принять пакет, и максимальное расстояние R_{sensor} , на котором сенсор может «услышать» сигнал от другого сенсора, указаны в табл. 2. Считается, что пакет может быть поврежден только из-за коллизии с другими пакетами данной сети.

Сенсоры потребляют различную мощность в зависимости от того, в каком состоянии они находятся (см. табл. 3). При передаче данных сенсор потребляет мощность P_{tx} , при приёме — P_{rx} , при прослушивании канала в режиме LBT и при ожидании подтверждения — P_{sense} .

В данной работе ставится следующая задача: в описываемом сценарии сравнить среднее энергопотребление устройств на передачу пакета при использовании сенсорами таких методов доступа, как Aloha, ненастойчивый CSMA, р-настойчивый CSMA и ненастойчивый CSMA с переносом частоты.

5 Результаты моделирования

Для описанного в разделе 4 сценария была разработана имитационная модель для исследования энергопотребления E сенсора на успешно переданный пакет в зависимости от интенсивности трафика. Величина E вычисляется, как отношение суммарного энергопотребления сенсоров за время эксперимента, делённое на количество успешных пакетов. Данное значение усреднялось по 50 прогонам эксперимента с разными начальными значениями генератора случайных чисел.

На рис. 1 и 2 показаны зависимости энергопотребления от суммарной интенсивности трафика для шести режимов работы сенсоров (Aloha, ненастойчивый CSMA, р-настойчивый CSMA со сменой частоты, настойчивый

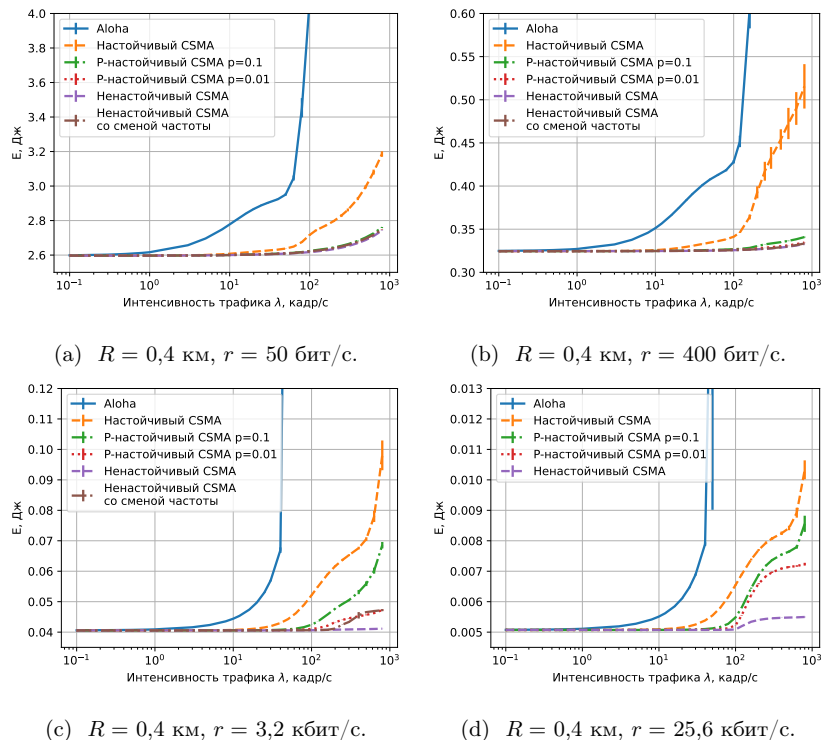


Рис. 1: Зависимость среднего энергопотребления сенсоров на успешно переданный кадр от интенсивности трафика, $R = 0,4$ км.

CSMA, р-настойчивый CSMA с $p = 0,1$, р-настойчивый CSMA с $p = 0,01$) для разных скоростей передачи данных.

Рассмотрим сеть радиуса $R = 0,4$ км. В такой сети все сенсоры находятся в области видимости друг друга.

На рис. 1а и рис. 1б изображена зависимость энергопотребления на успешно переданный пакет от интенсивности трафика для скоростей 50 и 400 бит/с, соответственно. Видно, что при малой интенсивности трафика энергопотребление для режимов Aloha и CSMA практически не отличается. Это объясняется тем, что при малой интенсивности трафика сенсоры с большой вероятностью передают в разные интервалы времени и, поскольку для передачи требуется узкий диапазон частот, выбираемые ими каналы пересекаются редко. В результате в случае режима Aloha коллизии случаются редко, а в случае CSMA для сенсора канал обычно оказывается свободным и на прослушивание канала потребляется немного энергии. При больших интенсивностях трафика в режиме Aloha потребляется значительно больше

энергии из-за коллизий и связанных с ними повторными попытками передачи. Из всех видов CSMA больше всего энергии потребляется при использовании настойчивого CSMA — на прослушивание канала и повторные передачи в случае коллизий, вероятность которых в этом режиме больше в сравнении с другими алгоритмами прослушивания канала, которые тратят почти одинаковое небольшое количество энергии.

На рис. 1с и рис. 1d изображена зависимость энергопотребления на успешно переданный пакет от интенсивности трафика для скоростей 3,2 кбит/с и 25,6 кбит/с, соответственно. Заметим также, что для скорости передачи данных, равной 25,6 кбит/с, не показана зависимость для ненастойчивого CSMA с переносом частоты: при таких соотношениях скорости передачи и ширины канала все устройства передают на одной центральной частоте. При малой интенсивности трафика энергопотребление также почти не отличается для разных режимов. При больших интенсивностях сенсоры в режиме Aloha тратят много энергии на повторные отправки пакетов из-за коллизий. Также становится заметной разница между энергопотреблением при разных видах CSMA, что связано с различным временем прослушивания канала и вероятностью коллизии. Больше всего энергии потребляется в режиме настойчивого CSMA. Это связано с тем, что при использовании настойчивого CSMA сенсор должен прослушивать канал, ожидая освобождение канала, а также с тем, что когда во время передачи данных каким-то сенсором несколько других сенсоров генерируют кадры и планируют их передать в пересекающихся диапазонах частот, то по окончании текущей передачи они начинают свою передачу одновременно, и происходит коллизия. После настойчивого CSMA наибольшее энергопотребление получается при использовании р-настойчивого CSMA с $p = 0,1$, и немного меньшее энергопотребление получается при $p = 0,01$. Как и в случае настойчивого CSMA, при использовании р-настойчивого CSMA сенсор потребляет энергию, прослушивая канал и ожидая, пока канал освободится. В случае, когда несколько сенсоров генерируют кадры во время чужой передачи, после окончания передачи может произойти коллизия, вероятность которой возрастает при увеличении p . Наименьшее энергопотребление имеет ненастойчивый CSMA, так как при его использовании сенсор потребляет меньше всего энергии на прослушивание канала и при этом избегает коллизии.

Рассмотрим сеть радиуса $R = 3$ км. В такой сети не все устройства могут заметить передачу друг друга, поэтому прослушивание среды оказывается менее эффективным, чем в сети радиуса $R = 0,4$ км. На рис. 2а, 2б, 2с и 2д показана зависимость энергопотребления на успешно переданный пакет от интенсивности трафика для скоростей 50, 400, 3200 и 25600 бит/с, соответственно. Результаты для скорости 50 бит/с аналогичны результатам для сценария с радиусом сети равным $R = 0,4$ км, что связано с тем, что при такой скорости сенсоры с высокой вероятностью могут передавать на непересекающихся диапазонах частот. Для скоростей передачи данных 400, 3200 и 25600 бит/с результаты отличаются от предыдущего сценария — появляется разница в энергопотреблении при большой интенсивности трафика при ра-

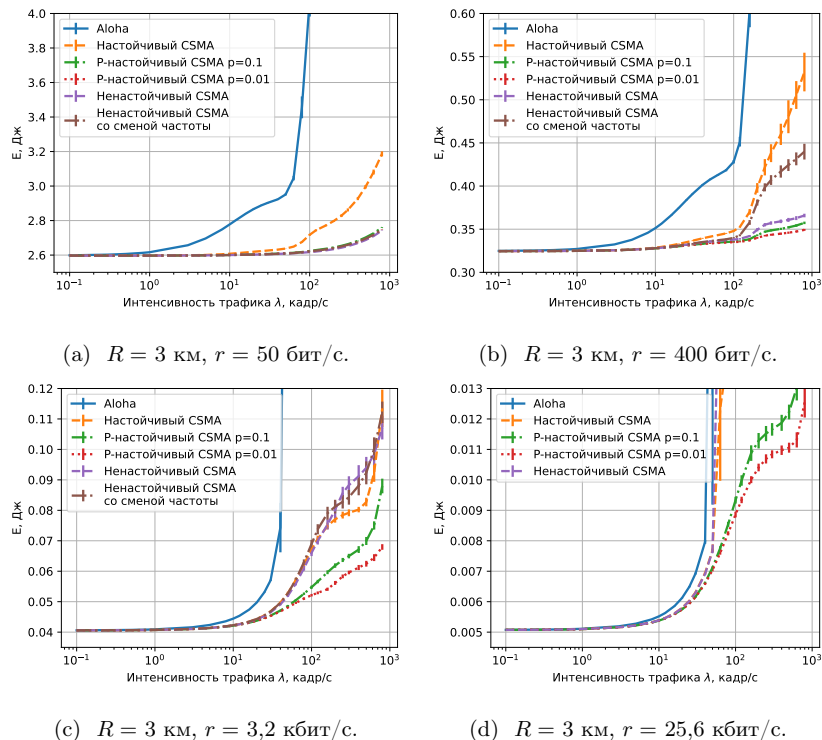


Рис. 2: Зависимость среднего энергопотребления сенсоров на успешно переданный кадр от интенсивности трафика, $R = 3$ км.

боте в разных режимах CSMA. Это связано с тем, что сенсоры, обнаружив занятую среду и подождав, пока она освободится, не могут задетектировать передачу сенсоров, находящихся далеко, но в режиме р-настойчивого CSMA сенсор приступает к передаче только с вероятностью p , если канал свободен, и в результате передаёт реже, чем при использовании ненастойчивого или настойчивого CSMA. В результате р-настойчивый CSMA оказывается более эффективным из-за более редких попыток передачи. Заметим, что различие между энергопотреблением CSMA в сценариях $R = 0,4$ км и $R = 3$ км тем больше, чем больше скорость. Это связано, во-первых, с тем, что расстояние, на котором сенсор может детектировать передачу другого сенсора, уменьшается при увеличении скорости, и, во-вторых, с тем, что при увеличении скорости падает вероятность того, что сенсоры смогут выбрать непересекающиеся диапазоны частот для передачи.

6 Заключение

В работе были рассмотрены сети NB-Fi при использовании методов доступа к каналу с прослушиванием несущей перед передачей и без прослушивания. Сравнивались методы доступа Aloha, ненастойчивый CSMA, ненастойчивый CSMA с переносом частоты и р-настойчивый CSMA. Рассматривались сценарии малой сети радиуса 0,4 км, в которой все сенсоры находятся в зоне видимости друг друга, и большой сети радиуса 3 км, в которой некоторые сенсоры не могут детектировать передачи других сенсоров. Для данных сценариев были получены зависимости среднего энергопотребления на успешно переданный пакет от суммарной интенсивности трафика.

Анализ результатов моделирования показал, что при суммарной нагрузке ниже 1 кадра в секунду использование CSMA не даёт значимого выигрыша в энергопотреблении относительно Aloha. При высокой нагрузке (больше 30 кадров в секунду) CSMA позволяет более чем в два раза понизить энергопотребление по сравнению с Aloha. Из рассмотренных видов CSMA, самые высокие показатели энергопотребления в области высокой интенсивности трафика имеет настойчивый CSMA. При этом в сетях с малым радиусом при высокой интенсивности трафика наименьшее энергопотребление показывает ненастойчивый CSMA, а в сетях с большим радиусом — р-настойчивый CSMA с малым p .

Список литературы

1. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. — Access mode: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (online; accessed: 7 December 2021).
2. ГОСТ Р 70036—2022. Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала (NB-Fi) : 2022.
3. Performance evaluation of channel access in NB-Fi networks / Bankov Dmitry, Levchenko Polina, Lyakhov Andrey, and Khorov Evgeny // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2022. — Vol. 67, no. 6. — P. 747–754.
4. Kleinrock L., Tobagi F. Packet Switching in Radio Channels: Part I - Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics // IEEE Transactions on Communications. — 1975. — Vol. 23, no. 12. — P. 1400–1416.
5. Low Power Wide Area Network Technologies for Smart Cities Applications / Pham Tung Lam, Nguyen Hoan, Nguyen Huy, Bui Van, and Jang Yeong Min // 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC) / IEEE. — 2019. — P. 501–505.
6. The IIoT/IoT device control model based on narrow-band IoT (NB-IoT) / Petrenko Alexey S, Petrenko Sergei A, Makoveichuk Krystina A, and Chetyrbok Petr V // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus) / IEEE. — 2018. — P. 950–953.

7. Blaszczyszyn Bartłomiej, Muhlethaler Paul, Banaouas Skander. A comparison of ALOHA and CSMA in wireless ad hoc networks under different channel conditions // INRIA-00530093. — 2010.
8. Mazin Asim, Elkourdi Mohamed, Gitlin Richard D. Comparison of slotted ALOHA-NOMA and CSMA/CA for M2M communications in IoT networks // 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall) / IEEE. — 2018. — P. 1–5.
9. Ortín Jorge, Cesana Matteo, Redondi Alessandro. How do ALOHA and listen before talk coexist in LoRaWAN? // 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) / IEEE. — 2018. — P. 1–7.
10. To Thanh-Hai, Duda Andrzej. Simulation of LoRa in ns-3: Improving LoRa Performance with CSMA // 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). — 2018. — P. 1–7.
11. Baddula Mounika, Ray Biplob, Chowdhury Morshed. Performance Evaluation of Aloha and CSMA for LoRaWAN Network // 2020 IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE) / IEEE. — 2020. — P. 1–6.
12. Hata Masaharu. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services // IEEE transactions on Vehicular Technology. — 1980. — Vol. 29, no. 3. — P. 317–325.
13. Implementation and validation of an IEEE 802.11ah module for ns-3 / Tian Le, Deronne Sébastien, Latré Steven, and Famaey Jeroen // Proceedings of the Workshop on ns-3. — 2016. — P. 49–56.

Разработка и исследование методов координированных передач Wi-Fi 7 *

И.И. Гайнуллин^{1,2}, А.В. Кротов¹

gainullin@wireless.iitp.ru, krotov@iitp.ru

- ¹ Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук
² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Аннотация В связи с появлением новых приложений, таких как приложения дополненной и виртуальной реальности, растут запросы к пропускной способности беспроводных сетей. Одним из способов повышения пропускной способности является увеличение количества точек доступа и использование механизмов пространственного мультиплексирования (англ.: Spatial Reuse, SR), позволяющих соседним точкам доступа вести передачу одновременно. Однако использование существующих механизмов пространственного мультиплексирования, таких как OBSS PD, в ряде сценариев приводит к несправедливому распределению канальных ресурсов. В новых стандартах сетей Wi-Fi 7 эту проблему призваны решить механизмы координированного пространственного мультиплексирования CSR (англ.: Coordinated Spatial Reuse). В статье исследуется работа механизма CSR и предлагается алгоритм выбора его параметров.

Keywords: Wi-Fi · беспроводные локальные сети · пространственное мультиплексирование · плотные сети

1 Введение

Требования к пропускной способности беспроводных сетей растут. Один из очевидных способов увеличения пропускной способности — установка дополнительных точек доступа, чтобы уменьшить расстояние до пользовательских устройств и таким образом повысить мощность принимаемого сигнала. Однако увеличение плотности беспроводных сетей также приводит к увеличению мощности интерференции со стороны соседних сетей, что снижает их пропускную способность.

Пропускная способность сети зависит от того, какие устройства могут передавать одновременно и какие параметры передачи, такие как мощность

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00788, <https://rscf.ru/project/20-19-00788/>

сигнала и используемая сигнально-кодовая конструкция (СКК), они используют. Для управления этими параметрами в стандарте сетей Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) было предложено несколько механизмов пространственного мультиплексирования (англ.: Spatial Reuse, SR), в частности механизм OBSS PD (англ.: Overlapping Basic Service Set Packet Detection).

Однако механизм OBSS PD не позволяет существенно повысить пропускную способность сетей, поскольку устройства принимают решения независимо и не учитывают данные о взаимном расположении устройств. Поэтому при разработке стандарта сетей Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) было предложено рассмотреть механизмы координации между точками доступа (см. [1]). Одним из таких механизмов является механизм координированного пространственного мультиплексирования (англ.: Coordinated Spatial Reuse, CSR).

Целью данного исследования является разработка алгоритма выбора параметров механизма CSR, увеличивающего суммарную пропускную способность сетей в сравнении с механизмом случайного доступа EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access), не приводя к уменьшению пропускной способности каждого отдельного соединения.

В разделе 2 описаны существующие методы доступа к среде и механизмы пространственного мультиплексирования. В разделе 3 рассматриваются предлагаемые для включения в стандарт Wi-Fi 7 механизмы координации передач, в частности CSR. В разделе 4 приводится обзор существующих работ по данной теме. В разделе 5 описан предлагаемый алгоритм выбора параметров CSR. В разделе 6 приводится описание рассматриваемого сценария, в котором проводится сравнение механизмов OBSS PD и CSR. В разделе 7 приводятся численные результаты. Заключение приводится в разделе 8.

2 Доступ к среде в сетях Wi-Fi 6

Рассмотрим работу базового механизма доступа к среде, используемого в сетях Wi-Fi, и существующие механизмы пространственного мультиплексирования.

2.1 Определение занятости среды

Прежде всего рассмотрим механизмы определения занятости среды, используемые в сетях Wi-Fi.

Среда считается занятой, если на это указывает хотя бы один механизм определения занятости среды:

- если станция декодировала преамбулу чужой передачи и мощность принимаемого сигнала выше, чем порог PD (англ.: Packet Detect), равный -82 дБм;
- если преамбула не была декодирована, но мощность принимаемого сигнала превышает порог ED (англ.: Energy Detect), равный -62 дБм;
- если на это указывает механизм определения виртуальной занятости среды NAV (англ.: Network Allocation Vector).

Механизм виртуальной занятости среды NAV представляет собой таймер, установленный на каждой из станций и указывающий на время, в течение которого среда должна считаться занятой. Изначально значение таймера принимается равным нулю и обновляется благодаря полю заголовка канального уровня Duration, в котором передающая станция указывает длительность последовательности обмена кадрами, в течение которой канал должен считаться занятым. Станция, принявшая кадр, но не являющаяся его получателем, обновляет значение таймера NAV, устанавливая его в значение поля Duration принятого кадра, если текущее значение таймера NAV меньше значения поля Duration. Со временем значение таймера равномерно убывает.

2.2 EDCA

По умолчанию все станции и точки доступа используют механизм случайного доступа EDCA, основанный на механизме множественного доступа с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA).

Перед началом передачи станция проводит процедуру случайной отсрочки. Станция устанавливает счетчик отсрочки, инициализируя его случайным целым числом, равновероятно выбираемым из интервала $[0, W - 1]$, где W — значение текущего конкурентного окна. Если канал свободен в течение одного слота длительностью σ , она уменьшает значение счетчика отсрочки на единицу. В противном случае счетчик замораживается до момента, пока канал не будет свободен в течении промежутка времени *AIFS* (англ.: Arbitration InterFrame Space). Когда счетчик отсрочки достигает нулевого значения, станция осуществляет попытку передачи. В случае успеха и получения подтверждения, значение текущего конкурентного окна сбрасывается до W_{min} . В случае же неудачи значение текущего конкурентного окна удваивается. Удвоение может продолжаться до момента, пока значение текущего конкурентного окна не достигнет величины W_{max} . EDCA определяет четыре категории доступа (англ.: Access Category), которые имеют различные значения W_{min} , W_{max} и *AIFS*. Значение *AIFS* равно $SIFS + AIFSN \cdot \sigma$. Значения W_{min} , W_{max} и *AIFSN* представлены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры EDCA

Access Category	W_{min}	W_{max}	<i>AIFSN</i>
VO	3	7	2
VI	7	15	2
BE	15	1023	3
BK	15	1023	7

Несмотря на использование вышеописанных механизмов определения занятости среды, в плотных сетях возможны сценарии, в которых передатчик

считает среду свободной и начинает вещать, в то время как среда занята передачей соседней сети на стороне приемника. Эта проблема называется проблемой скрытой станции (англ.: hidden terminal problem) (см. [2]). Одним из предлагаемых стандартом Wi-Fi решений этой проблемы является механизм RTS/CTS (англ.: Request-to-Send/Clear-to-send). Перед началом передачи станция отправляет кадр RTS и ожидает получения в ответ кадра CTS от приемника. Станции, соседние с передатчиком и приемником, принимают кадры RTS и/или CTS, и устанавливают таймер NAV в указанное в этих кадрах значение длительности передачи, запрещая им тем самым передавать в уже занятой среде и резервируя канал. Тем не менее, использование механизма RTS/CTS не всегда обеспечивает отсутствие интерференции со стороны соседних сетей. Как показано в [3], даже если станция находится вне области приема кадра CTS, мощности интерференции с ее стороны может быть достаточно для того, чтобы кадр не был принят успешно.

2.3 OBSS PD

Механизм EDCA эффективно позволяет избегать коллизий в сценарии с одной точкой доступа, однако в плотных сетях области покрытия нескольких BSS могут пересекаться. Вследствие, мощность принимаемого сигнала от соседней точки доступа может превысить стандартный порог PD, а тогда точки доступа не смогут передавать одновременно. В таких сценариях EDCA вынуждает ждать точки доступа, не успевшие перехватить TXOP (англ.: Transmission Opportunity), когда те могли бы передавать, хотя и со сниженной мощностью, что существенно повысило бы пропускную способность сетей.

В стандарте Wi-Fi 6 предложен механизм OBSS PD, позволяющий точкам доступа использовать по отношению к кадрам соседнего BSS порог определения занятости среды OBSS_PD, превышающий стандартный порог PD. А для того, чтобы станции могли отличать кадры, отправленные станциями из соседнего BSS, до того, как кадр будет принят полностью, в заголовок физического уровня стандарта 802.11ax включено поле, называемое цветом BSS (англ.: BSS color). Получается, что если цвет BSS принятого кадра совпадает с цветом BSS принимающей его станции (intra-BSS передача), то применяется стандартный порог PD, а если цвета отличаются, то применяется порог OBSS_PD (inter-BSS передача).

Стандарт не специфицирует, как именно точка доступа выбирает порог OBSS_PD, но ограничивает диапазон его значений интервалом от -82 дБм до -62 дБм. Таким образом, этот порог может быть выше стандартного порога PD, но не может превышать порог ED.

При этом стандарт накладывает ограничение на мощность передачи, ведущейся одновременно с inter-BSS передачей. Если станция игнорирует передачу соседней сети и продолжает отсчет счетчика отсрочки, то мощность последующей передачи не может превышать

$$TX + PD - OBSS_PD, \quad (1)$$

где T_X — мощность передачи при использовании стандартного порога определения занятости среды. По умолчанию $T_X = 21$ дБм.

2.4 Parameterized Spatial Reuse

При передаче с использованием OFDMA в восходящем канале стандарт 802.11ax позволяет использовать механизм пространственного мультиплексирования PSR (англ.: Parameterized Spatial Reuse), работающий следующим образом.

Для использования PSR точка доступа указывает в триггер-кадре параметры передачи в восходящем канале, а также сумму мощности передачи триггер-кадра T и допустимого уровня интерференции I . Соседняя точка доступа, получив этот триггер-кадр с мощностью R , может вычислить максимально допустимую мощность собственной передачи $T + I - R$, при которой мощность интерференции на точке доступа, отправившей триггер-кадр, не превысит I .

В сравнении с OBSS PD, механизм PSR позволяет более точно контролировать влияние интерференции, поскольку строго ограничивает уровень интерференции на приемнике. Недостатком данного механизма является то, что его можно использовать только для передач в восходящем канале.

3 Coordinated Spatial Reuse

Рассмотрим один из механизмов координированного пространственного мультиплексирования, предлагаемый для включения в стандарт Wi-Fi 7 (см. [4]).

Для данного механизма CSR необходимо, чтобы рассматриваемая система состояла из двух или более BSS, точки доступа которых находятся в области радиовидимости друг друга. В этом случае точки доступа могут обнаружить друг друга посредством биконов (англ.: beacon) — периодически рассылаемых точками доступа служебных кадров. Таким образом, каждая точка доступа знает, какие из соседних точек доступа поддерживают механизм CSR.

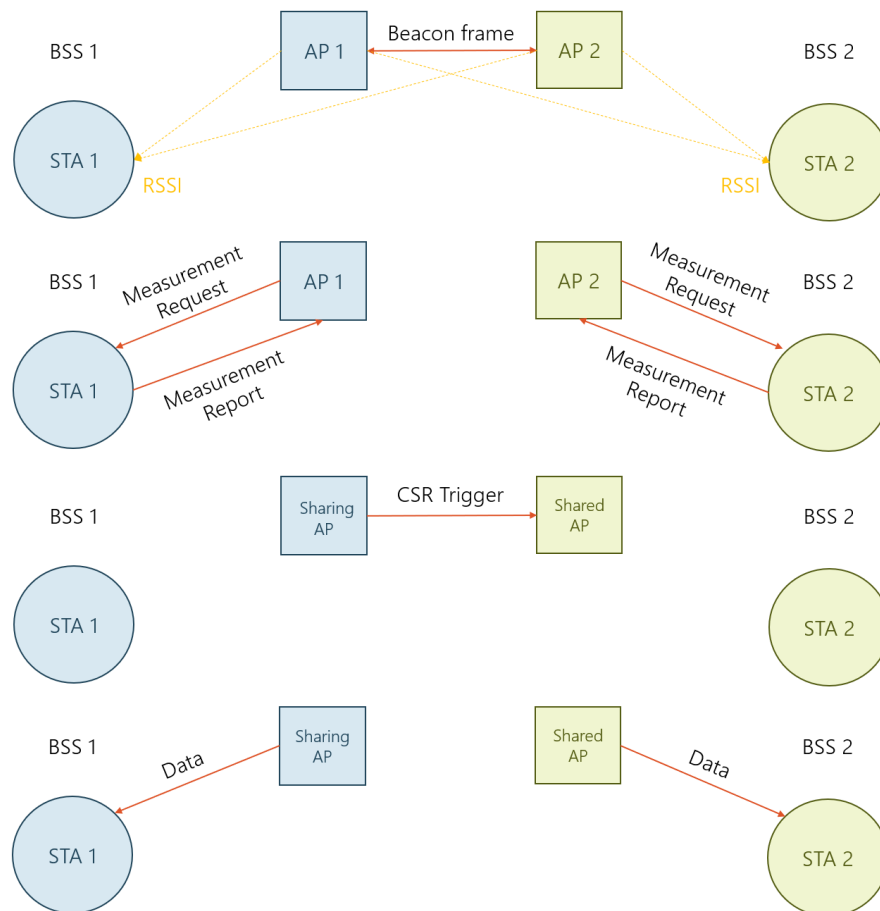


Рис. 1: Последовательность обмена кадрами в механизме CSR

Для начала использования CSR точка доступа отправляет своим станциям запрос результатов измерений (англ.: Measurement Result Request), в ответ на который станции отправляют отчет об измерениях (англ.: Measurement Result Report), содержащий полученные на станциях данные об RSSI (англ.: Received Signal Strength Indicator) от всех точек доступа в области радиовидимости станций.

Получившая доступ к среде, согласно правилам EDCA, точка доступа называется Sharing AP (англ.: Sharing Access Point). Она выбирает одну из соседних точек доступа, называемую в дальнейшем Shared AP. Используя информацию о RSSI сигнала, получаемого станцией от Sharing AP, и

зная отношение сигнал/шум, требуемое для успешного приема кадра на выбранной сигнально-кодовой конструкции, Sharing AP рассчитывает допустимый уровень интерференции на приемнике ARIL (англ.: Acceptable Receiver Interference Level).

Перед началом собственной передачи Sharing AP, например, посредством триггер-кадра, передает Shared AP значение RSSI сигнала, получаемого станцией от Shared AP, и вычисленное значение ARIL. После этого Shared AP может начать передачу при условии, что она снизит мощность собственной передачи на величину $RSSI - ARIL$.

4 Обзор литературы

Стандарт IEEE 802.11be предлагает множество улучшений, позволяющих повысить производительность сетей Wi-Fi. Помимо увеличения ширины полосы со 160 до 320 МГц, поддержки модуляции высокого порядка вплоть до 4096-QAM (вместо 1024-QAM в стандарте IEEE 802.11ax) и возможности назначать несколько RU одной станции при использовании OFDMA, наиболее существенными функциями названы поддержка использования нескольких каналов (англ.: Multi-Link Operation) и координация между точками доступа (англ.: Multi-AP Coordination). Предлагаемые улучшения направлены не только на увеличение пропускной способности, но и поддержку новых видов приложений, таких как приложения реального времени (англ.: Real Time Applications, RTA), требующие низкой задержки передачи данных. Планируется, что работа над стандартом Wi-Fi 7 будет завершена в 2024 [5].

Работа над стандартом IEEE 802.11be разделена на две части. Предполагается, что в первую часть работы войдет простой в реализации механизм координации между точками доступа, такой как CSR, а во второй части будет стандартизирован один из более сложных механизмов, такой как координированные направленные передачи (англ.: Coordinated Beamforming) [6]. Необходимость последующей стандартизации более сложного механизма обусловлена тем, что простые механизмы, такие как PSR и CSR, позволяют контролировать уровень интерференции только одной точке доступа (Sharing AP), в то время как вторая точка доступа (Shared AP) передает с меньшей мощностью и не может управлять своей мощностью интерференции. Более сложный механизм координации позволит нескольким точкам доступа выбирать параметры передачи совместно.

Использование механизма PSR для снижения задержки передачи данных исследовано в работе [7] путем имитационного моделирования. В рассмотренных сценариях со смешанным типом трафика, в которых в восходящем канале одни станции передают фоновый трафик, а другие передают данные приложения, требующие низкой задержки. Показано, что использование механизма PSR позволяет существенно снизить задержку передачи данных при высокой нагрузке.

В статье [8] предложен алгоритм выбора скорости передачи, учитывающий цвет и изменение мощности интерферирующей передачи при использо-

вании OBSS PD. Показано, что если использовать алгоритм выбора скорости передачи, не учитывающий использование механизма пространственного мультиплексирования, включение OBSS PD может в некоторых сценариях ухудшить производительность. В статье [8] был предложен алгоритм выбора скорости передачи, учитывающий цвет и изменение мощности интерферирующей передачи при использовании OBSS PD. Показано, что если использовать алгоритм выбора скорости передачи, не учитывающий использование механизма пространственного мультиплексирования, включение OBSS PD может в некоторых сценариях ухудшить производительность.

Повышение производительности сети путем использования координации между точками доступа исследовано в [9]. Авторы рассмотрели способ реализации CSR, при котором точка доступа, получившая доступ к среде (Sharing AP), собирает информацию об RSSI сигналов, принимаемых всеми соседними станциями от всех соседних точек доступа. Используя эту информацию, Sharing AP с помощью полного перебора выбирает точки доступа, мощности передачи и используемые СКК, максимизирующие суммарную пропускную способность всех соединений. Показано, что управление мощностью передачи необходимо для повышения пропускной способности сети, однако для практической реализации CSR требуется разработка алгоритмов имеющих меньшую вычислительную сложность и не требующих полного перебора множества решений.

5 Алгоритм выбора параметров механизма CSR

В разделе 3 предполагалось, что точка доступа может вычислить значение допустимого уровня интерференции ARIL исходя из требований к отношению сигнал/шум выбранной СКК, однако не указано, каким образом точка доступа выбирает СКК для передачи. Использование СКК более высокого порядка повышает пропускную способность Sharing AP, но приводит к увеличению значения ARIL, и, как следствие, снижению мощности передачи Shared AP и ее пропускной способности. В данном разделе предлагается способ выбора СКК и значения ARIL при использовании механизма CSR.

Заметим, что при получении доступа к среде с использованием механизма EDCA уровень интерференции со стороны соседних точек доступа ограничен порогом $PD = -82$ дБм. Точки доступа, использующие EDCA и стандартное значение порога PD, откладывают передачу в случае, если мощность принимаемого сигнала между соседними AP превышает данный порог. В то же время устройства, использующие OBSS PD, и игнорирующие передачи большей мощности, пропорционально снижают мощность своей передачи таким образом, чтобы уровень интерференции не изменился.

Таким образом, при наличии устройств, не поддерживающих механизм CSR, невозможно обеспечить уровень интерференции, меньший чем порог PD. При наличии интерференции со стороны таких устройств снижение значения ARIL значительно ниже PD приведет к снижению мощности Shared AP и ее пропускной способности, но не приведет к повышению СКК Sharing AP и ее

пропускной способности. Поэтому в данной работе предлагается выбирать параметры алгоритма CSR таким образом, чтобы уровень интерференции на станции, принимающей данные от Sharing AP, не превышал стандартный порог PD.

Рассмотрим механизм снижения мощности на Shared AP. Для этого введем определения обозначений, указанных на рис. 2.

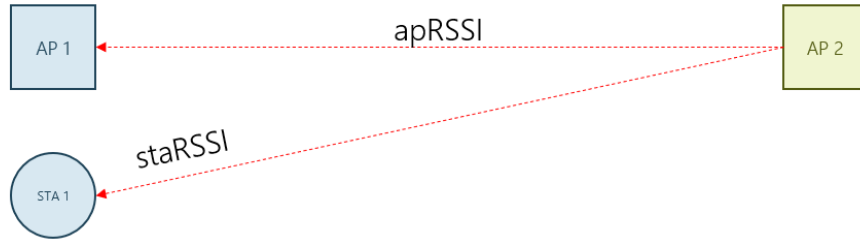


Рис. 2: Обозначения RSSI от AP 2 на AP 1 и STAs

На Sharing AP дополнительно проводится измерение RSSI от Shared AP. RSSI этого сигнала обозначается как $apRSSI$. Измеренный на станции Sharing AP RSSI от Shared AP обозначается как $staRSSI$. $diffRSSI$ — разность между $apRSSI$ и $staRSSI$ — вычисляется по формуле

$$diffRSSI = apRSSI - staRSSI. \quad (2)$$

Для того, чтобы уровень интерференции на получателе Sharing AP не превышал $PD = -82$ дБм, мощность передачи Shared AP не должна превышать

$$TX_maxpower = TX - (OBSS_PD - PD) + diffRSSI, \quad (3)$$

где TX — мощность передачи по умолчанию, $OBSS_PD$ — порог определения занятости среды для inter-BSS передач.

6 Сценарий

Рассматривается сеть Wi-Fi, состоящая из двух точек доступа, каждая из которых имеет по одной станции.

Используется модель потерь на трассе с логарифмическим расстоянием, согласно которой мощность принимаемого сигнала на расстоянии $l > l_0$ равна

$$R(l) = T - 10\gamma \lg \frac{l}{l_0} - PL_0, \quad (4)$$

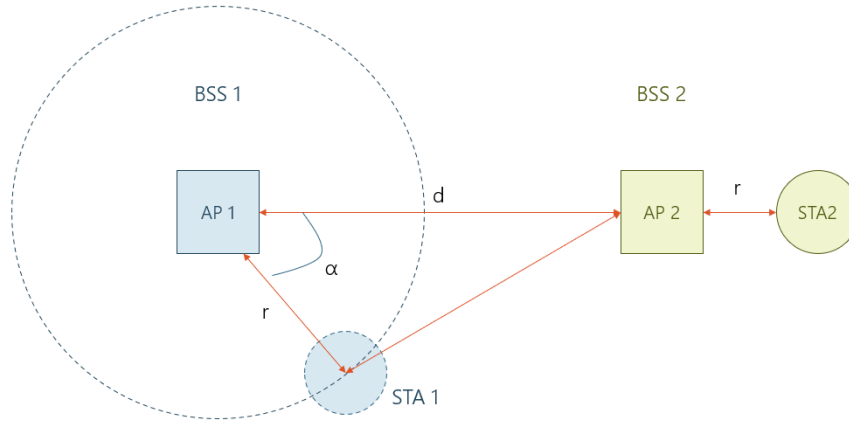


Рис. 3: Рассматриваемый сценарий

где T — мощность передаваемого сигнала в дБм, $\gamma = 3$ — логарифмический показатель затухания, $l_0 = 1$ м — расстояние, на котором затухание составляет $PL_0 = 46.7$ дБм.

Устройства расположены, как показано на рис. 3. Расстояние между точками доступа равно d , оно выбрано таким образом, чтобы мощность сигнала, принимаемого одной точкой доступа от другой, превышала порог PD. При выбранных параметрах (см. таб. 2) мощность принимаемого сигнала равна -79 дБм.

Расстояние от точек доступа до станций равно r . Угол α является параметром эксперимента, его значение лежит в интервале от 0 до 180 градусов.

При использовании OBSS PD и CSR точки доступа выбирают уровень OBSS_PD равным мощности принимаемого сигнала от соседней точки доступа. При использовании CSR для выбора параметров механизма используется алгоритм, описанный в разделе 5.

Все параметры проведенных экспериментов указаны в таб. 2.

7 Численные результаты

Варьируя угол α в интервале от 180 до 0 градусов, измерим пропускные способности соединений BSS 1 и BSS 2 при использовании механизмов EDCA, OBSS PD или CSR на всех устройствах. Наибольшее влияние на производительность оказывает интерференция от соседней точки доступа на станции, поэтому строить будем зависимость пропускных способностей от мощности принимаемого сигнала AP 2 на STA 1 при использовании максимальной мощности передачи. Полученные результаты представлены на рис. 4. На рис. 5 построена также зависимость среднего геометрического пропускных

Таблица 2: Параметры экспериментов

Параметр	Значение
Стандарт	802.11ax
Диапазон частот	5 ГГц
Защитный интервал	3200 нс
Ширина канала	20 МГц
Размер MSDU	1500 Б
Порог PD	-82 дБм
Порог ED	-62 дБм
Чувствительность приемника	-82 дБм
Категория доступа	Best Effort (BE)
Агрегация MPDU	есть
Агрегация MSDU	нет
RTS/CTS	нет
Нагрузка	100 Мбит/с
Длительность эксперимента	100 с
Расстояние между AP (d)	60 м
Расстояние между AP и их STA (r)	20 м
Мощность передачи AP	21 дБм
Мощность передачи STA	21 дБм

способностей двух BSS от мощности принимаемого сигнала на STA 1 от AP 2.

Согласно результатам, механизм CSR в исследуемом сценарии обеспечивает до двух раз большую суммарную пропускную способность, чем механизм EDCA. Также ни в одном из сценариев производительность каждого отдельного BSS относительно показателей, демонстрируемых механизмом EDCA, не ухудшилась при использовании механизма CSR. Этого не удалось добиться при использовании механизма OBSS PD в сценариях, когда станция STA 1 находилась близко к интерферирующей точке доступа, интерференция от которой мешала станции успешно принимать кадры данных.

График зависимости среднего геометрического пропускных способностей (см. рис. 5) позволяет сделать выводы о справедливости распределения ресурсов между соединениями. Так, чем ближе по значению пропускные способности сетей и чем выше это значение, тем больше их среднее геометрическое. Среднее геометрическое пропускных способностей при использовании механизма OBSS PD и при небольших расстояниях между STA 1 и AP 2 (при которых мощность сигнала, принимаемого на STA 1 от AP 2, составляет от -77 до -74 дБм) оказывается меньше, чем при использовании механизма EDCA. В то же время соответствующий график для механизма CSR при всех значениях параметра α проходит выше, чем графики EDCA и OBSS PD.

Примечательно, что при значении мощности сигнала AP 2, принимаемого на STA 1, равном -79 дБм, CSR дает те же результаты, что и OBSS PD. Это объясняется тем, что значения мощностей принимаемых сигналов на

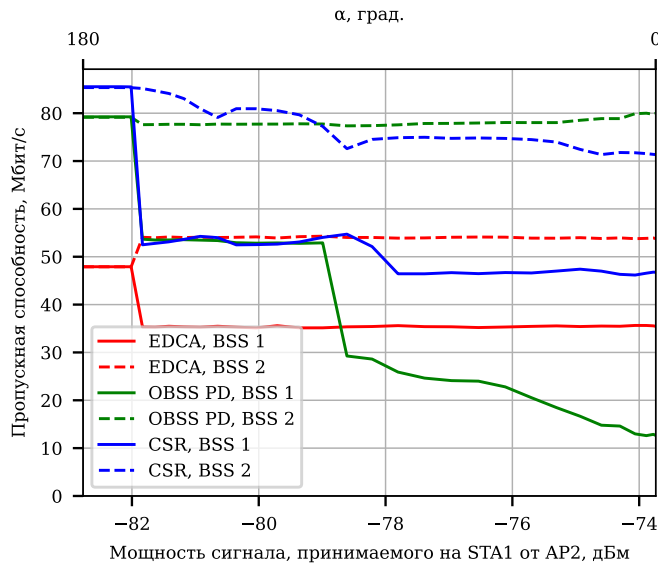


Рис. 4: Зависимость пропускных способностей от значения мощности принимаемого сигнала AP 2 на STA 1

AP 1 от AP 2 и на STA 1 от AP 2 совпадают, а значит $apRSSI = staRSSI$ и $diffRSSI = 0$.

При мощности принимаемого сигнала на STA 1 от AP 2 ниже $-82,0$ дБм, вне зависимости от используемого механизма пропускные способности отдельно каждого BSS равны, а суммарная пропускная способность канала выходит на плато. Порог PD равен -82 дБм, следовательно, после того, как значение мощности принимаемого сигнала на STA 1 от AP 2 переходит порог, пакеты от interfering BSS перестают распознаваться станцией BSS 1, и, при фиксированном расстоянии между точками доступа, пропускные способности соединений максимальны.

Обратим также внимание, что на участке, где значение мощности принимаемого сигнала на STA 1 от AP 2 меняется от $-78,6$ до $-79,0$ дБм, при использовании механизма OBSS PD наблюдается скачок в пропускной способности для первого соединения. AP 2 передает на сниженной мощности, и, во время прохождения STA 1 указанного участка, мощность принимаемого на STA 1 от AP 2 сигнала пересекает отметку в -82 дБм, что соответствует значению параметра чувствительности приемника (англ.: Receiver Sensitivity, RxSensitivity). А потому интерференция от AP 2 по мере дальнейшего увеличения расстояния между STA 1 и AP 2 перестает оказывать на STA 1 влияние.

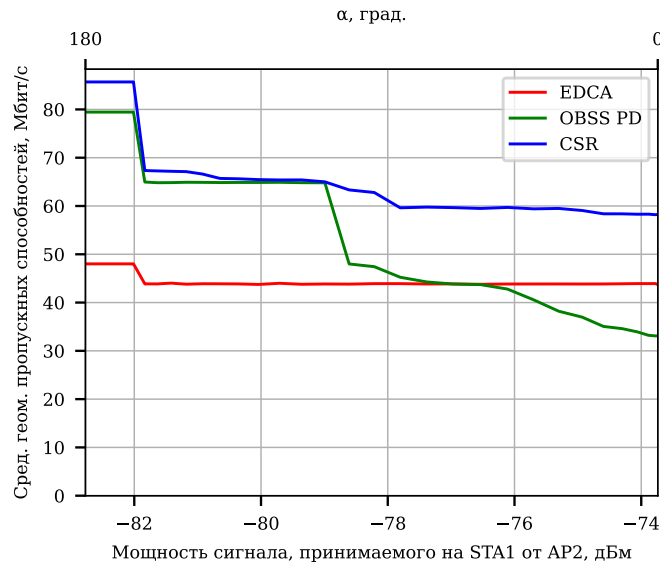


Рис. 5: Зависимость среднего геометрического пропускных способностей двух BSS от значения мощности принимаемого сигнала на STA 1 от AP 2

Немонотонность графика зависимости пропускных способностей соединений от мощности сигнала, принимаемого на STA 1 от AP 2, объясняется работой алгоритма выбора СКК, когда при переключении значения СКК скачкообразно меняется пропускная способность соединения.

8 Заключение

В данной работе исследована производительность механизма пространственного мультиплексирования, использующего координацию между точками доступа, предлагаемого для включения в стандарт сетей Wi-Fi 7. Предложен алгоритм выбора параметров данного механизма. Проведено сравнение с существующим механизмом OBSS PD, являющимся частью стандарта Wi-Fi 6 и не использующего координацию между точками доступа.

Путем имитационного моделирования в среде NS-3 показано, что использование механизма OBSS PD позволяет повысить суммарную пропускную способность сети, однако может приводить к существенному снижению производительности отдельных соединений и несправедливому распределению ресурсов. В то же время использование механизма CSR позволяет повысить суммарную пропускную способность всей сети до двух раз относительно EDCA, не приводя к снижению производительности отдельных соединений.

Сравнение средних геометрических пропускных способностей соединений при использовании механизмов EDCA, OBSS PD и CSR показало, что механизм CSR позволяет повысить пропускную способность, не снижая справедливость распределения ресурсов между соединениями.

Список литературы

1. S. Vermani, Terminology for AP Coordination.
URL <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-1926-02-0eht-terminology-for-ap-coordination.pptx>
2. F. Tobagi, L. Kleinrock, Packet switching in radio channels: Part II-The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution, *IEEE Transactions on communications* 23 (12) (1975) 1417–1433.
3. K. Xu, M. Gerla, S. Bae, How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in ad hoc networks, in: *Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM'02. IEEE, Vol. 1, IEEE, 2002*, pp. 72–76.
4. S. Park, Coordinated Spatial Reuse Procedure.
URL <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/20/11-20-0410-04-00be-coordinated-spatial-reuse-procedure.pptx>
5. E. Khorov, I. Levitsky, I. F. Akyildiz, Current status and directions of ieee 802.11 be, the future wi-fi 7, *IEEE access* 8 (2020) 88664–88688.
6. A. Garcia-Rodriguez, D. Lopez-Perez, L. Galati-Giordano, G. Geraci, IEEE 802.11 be: Wi-Fi 7 strikes back, *IEEE Communications Magazine* 59 (4) (2021) 102–108.
7. E. de Carvalho Rodrigues, A. Garcia-Rodriguez, L. G. Giordano, G. Geraci, On the Latency of IEEE 802.11 ax WLANs with Parameterized Spatial Reuse, in: *GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference, IEEE, 2020*, pp. 1–6.
8. A. Krotov, A. Kiryanov, E. Khorov, Rate control with spatial reuse for Wi-Fi 6 dense deployments, *IEEE Access* 8 (2020) 168898–168909.
9. D. Nunez, F. Wilhelmi, S. Avallone, M. Smith, B. Bellalta, TXOP sharing with Coordinated Spatial Reuse in Multi-AP Cooperative IEEE 802.11 be WLANs, in: *2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), IEEE, 2022*, pp. 864–870.

Сравнительный анализ LPWAN-технологий: Sigfox, LoRaWAN, NB-Fi

П.А. Левченко^{1,2}, Д.В. Банков¹, А.И. Ляхов¹, Е.М. Хоров¹

{levchenko, bankov, lyakhov, khorov} @wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук,

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Аннотация Сети класса LPWAN являются перспективным решением для развертывания беспроводных сенсорных сетей. Наиболее популярными LPWAN-технологиями являются технологии LoRaWAN и Sigfox. Кроме того, планируется широкое применение сетей LPWAN на базе протокола NB-Fi, стандарт которого был утвержден в Российской Федерации в 2022 году. Возникает вопрос, в каких условиях лучше использовать ту или иную технологию, однако в научной литературе подробных сравнений NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN не представлено. В этой работе проводится сравнительный анализ данных LPWAN-технологий и исследуется, какая технология является наиболее надежной при равном количестве канальных ресурсов.

1 Введение

Интернет вещей стремительно развивается и набирает популярность. Согласно прогнозам, к 2025 году к Интернету вещей будет подключено 27 миллиардов устройств [1], многие из которых будут нуждаться в низком потреблении энергии и дальнем радиусе действия сети. Для развертывания сетей с этими требованиями разрабатываются технологии энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия (англ.: Low Power Wide Area Networks, LPWANs). LPWAN-технологии позволяют обслуживать большое количество устройств на больших расстояниях при малых затратах ресурсов. Одной из наиболее популярных LPWAN-технологий является технология LoRaWAN, разработанная компанией Semtech, сети которой развернуты в 170 странах [2]. Другой популярной LPWAN-технологией является технология Sigfox, разработанная одноименной компанией. Сети этой технологии оперируют более чем в 70 странах [3].

Также следует обратить внимание на технологию NB-Fi, разработанную компанией WAVIoT [4]. Стандарт этой технологии был принят в качестве национального стандарта РФ в 2022 году [5] и сети этой технологии активно разворачиваются в России [6] и других странах [7,8]. NB-Fi стал первым отечественным стандартизированным решением, которое планируется к широкому применению в сценариях мониторинга экологической ситуации, сбора

данных для ЖКХ, городского планирования и управления инфраструктурой. Кроме того, стандарт LoRaWAN принят в качестве предварительного национального стандарта РФ (ПНСТ) [9], а также идет обсуждение о принятии стандарта Sigfox в качестве ПНСТ [10].

У технологии NB-Fi есть ряд сходств как с Sigfox, так и с LoRaWAN, вследствие чего возникает вопрос, в каких сценариях передачи наиболее надежно использовать ту или иную технологию. На данный момент подробных сравнений технологий NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN в научной литературе не представлено — есть лишь обзорные статьи, в которых сравниваются номинальные параметры технологий, такие как используемые сигнально-кодовые конструкции и соответствующие им битовые скорости передачи. Такие параметры позволяют оценить производительность сетей на физическом уровне для соединений «точка-точка» [11, 12], однако производительность на канальном и более высоких уровнях, когда в сети присутствует большое количество устройств, может значительно отличаться из-за накладных расходов на передачу данных, межкадровых интервалов и коллизий, возникающих при случайном доступе к каналу.

В данной работе проводится сравнительный анализ протоколов NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN при помощи имитационного моделирования и определяется, какая технология и при каких условиях позволяет достичь наименьшей доли потерянных пакетов при передаче данных в восходящем потоке при равном количестве канальных ресурсов. Технологии сравниваются по такому показателю, так как доля потерянных пакетов напрямую связана с емкостью сети — важным показателем для сетей LPWAN, отражающим максимальное число устройств, которое можно обслужить в сети.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приводится краткое описание и сравнение протоколов NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN. В разделе 3 приводится обзор литературы. В разделе 4 описываются исследуемые сценарии работы сетей рассматриваемых LPWAN-технологий. В разделе 5 приведены результаты моделирования сетей и их анализ. Заключение работы содержится в разделе 6.

2 Описание протоколов

Сети NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN работают в нелицензируемом диапазоне частот, в котором действуют ограничения на излучаемую мощность. Например, в России сети этих технологий используют для передачи данных диапазон 868,7–869,2 МГц, где максимальная излучаемая мощность составляет 100 мВт.

Сети NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN состоят из оконечных устройств (сенсоров), базовых станций и единого сервера. В сетях этих технологий базовые станции и сервер соединены через широкополосный канал связи, однако на практике встречаются серверы, реализованные на базовых станциях. Передача данных между сенсорами и сервером осуществляется через базовые станции по беспроводному каналу с помощью протоколов NB-Fi, Sigfox или

LoRaWAN, при этом базовые станции работают в режиме ретранслятора. Сенсоры не подключены к одной конкретной базовой станции, то есть любая базовая станция, получившая кадр, перенаправляет его серверу. При передаче данных в нисходящем направлении сервер выбирает, какая базовая станция отправит кадр нужному сенсору.

Стандарт NB-Fi описывает параметры работы сетей в России, а стандарты Sigfox [13] и LoRaWAN [14, 15] описывают параметры работы сети для многих стран, в том числе России. Следовательно, далее будут рассмотрены российские параметры работы, так как все исследуемые технологии могут работать в российской конфигурации. Сравниваться технологии будут по используемой модуляции, режимам работы, параметрам кадров при передаче и методам доступа к каналу.

2.1 Модуляция

NB-Fi. В сетях NB-Fi используется относительная двоичная фазовая манипуляция несущей или двоичная фазовая манипуляция несущей для пакетов нисходящего направления (downlink-пакетов) и относительная двоичная фазовая манипуляция несущей для пакетов восходящего направления (uplink-пакетов).

В NB-Fi пакеты могут передаваться с четырьмя разными скоростями: 50, 400, 3200, 25600 бит/с. В силу соотношения неопределенности сигналы, передаваемые на разных скоростях, будут занимать разный диапазон по частоте, иметь разную мощность, при которой возможен прием, а также разные максимальные дальности передачи. Кроме того, от выбранной скорости зависит предельная чувствительность приема (S_{crit}^{nbfi}). Возможные значения S_{crit} показаны в таблице 1.

Sigfox. В сетях Sigfox используется относительная двоичная фазовая манипуляция несущей для передач uplink-пакетов и гауссова частотная манипуляция несущей для передач downlink-пакетов.

Сенсоры Sigfox могут выбирать скорость передачи кадра при каждой отправке в соответствии с разрешенными региональными параметрами. В России и во многих других европейских странах разрешено использовать две скорости передачи данных: 100 и 600 бит/с. Аналогично сетям NB-Fi, вследствие соотношения неопределенности при передаче на разных скоростях, изменяются занимаемый диапазон по частоте, максимальная дальность передачи и мощность, при которой возможен прием.

Предельная чувствительность приема в сетях Sigfox в канале восходящего направления равна -135 дБм [16] и в канале нисходящего направления -126 дБм [13].

LoRaWAN. Сенсоры LoRaWAN передают данные с помощью технологии LoRa, которая основана на расширении спектра методом линейной частотной модуляции. В технологии LoRa сигнал непрерывно изменяется по частоте в интервале BW относительно центральной частоты f_c . Частота сигнала

Таблица 1: Предельные чувствительности приема

NB-Fi		LoRaWAN			
Скорость, бит/с	S_{crit}^{nbfi} , дБм	SF	CR	Скорость, бит/с	S_{crit}^{lora} , дБм
50	-150	12	4/6	250	-137
400	-141	11	4/6	440	-136
3200	-132	10	4/5	980	-134
25600	-123	9	4/5	1760	-131
		8	4/5	3125	-128
		7	4/5	5470	-125

начинается с одного из 2^{SF} значений, где SF — коэффициент расширения, определяющий количество бит в символе. Затем частота увеличивается до значения $f_c + \frac{BW}{2}$, падает до минимального значения $f_c - \frac{BW}{2}$ и вновь увеличивается, пока не дойдет до начального значения.

Скорость передачи данных зависит от BW , CR и SF , где CR — скорость кодирования, которая может быть равна $\frac{4}{5}, \frac{4}{6}, \frac{4}{7}, \frac{4}{8}$ [14]. Большие значения SF приводят к меньшим скоростям, однако большим чувствительностям приема. Возможные значения предельной чувствительности приема (S_{crit}^{lora}) и скорости передачи данных в зависимости от выбранного коэффициента расширения SF и скорости кодирования CR при $BW = 125$ кГц показаны в таблице 1 [15].

2.2 Режимы работы

NB-Fi. Сенсоры NB-Fi могут работать в трех режимах. В режиме без приема (англ.: No RX или NRX), сенсоры могут отправлять данные и не могут принимать данные от сервера. Во втором режиме — режиме прерывистого приема (англ.: Discontinuous RX или DRX) — сенсоры передают данные и переходят в режим приема на непродолжительный промежуток времени сразу после окончания передачи. Сервер буферизирует все данные на отправку устройству и передает их в момент открытия временного «окна приема» на сенсоре. При работе в третьем режиме — режиме непрерывного приема (англ.: Continuous RX или CRX) — сенсор передает данные, в остальное время находится в режиме приема.

Sigfox. При каждой отправке данных сенсоры Sigfox выбирают, в каком из двух режимов пройдет передача данных. При необходимости передачи сервером данных сенсору, выбирается двунаправленный режим, при котором вскоре после приема кадра сервером отправляется кадр в нисходящем направлении, успешный прием которого должен быть подтвержден сенсором. Если же необходимости передать данные в нисходящем направлении нет, то выбирается однонаправленный режим, при котором сеанс передачи данных завершается после отправки кадра.

Кроме того, стандарт Sigfox предлагает два варианта передачи данных в канале восходящего направления: процедура передачи единичного кадра и процедура передачи нескольких кадров. В первом случае сеанс отправки данных завершается после передачи одного кадра. Во втором случае сенсор формирует и отправляет кадры с одинаковыми пользовательскими данными, закодированных разными многочленами сверточного кода.

LoRaWAN. Сенсоры LoRaWAN могут работать в трех режимах — класс А, В, С. Сенсоры класса А отправляют данные при необходимости и могут принимать данные от сервера в течение небольшого промежутка времени после отправки кадров. Второй режим называется класс В, при использовании которого помимо функций режима класса А сенсоры способны планировать передачи в нисходящем канале. Базовые станции с некоторым периодом отправляют синхронизирующий сигнал, который содержит в себе расписание передач в нисходящем канале. Сенсоры принимают эти сигналы и прослушивают канал по расписанию. Третий режим называется класс С. Сенсоры, способные работать в этом режиме, слушают сигнал все время, когда не передают данные серверу.

Стоит отметить, что сенсоры LoRaWAN класса А работают аналогично сенсорам NB-Fi, работающим в режим DRX, а сенсоры LoRaWAN класса С — сенсорам NB-Fi в режиме CRX.

2.3 Параметры кадров

NB-Fi. Все кадры в сети NB-Fi имеют фиксированную длину — 36 байт. Длина пользовательских данных в кадре составляет 8 байт. Если на отправку поступают пользовательские данные длиной более 8 и менее 240 байт, то сенсоры NB-Fi фрагментируют данные и выполняют групповую отправку кадров. В случае передачи данных без подтверждений сервер буферизирует принятые кадры, и если все кадры доставлены успешно, то выполняется обработка кадров на сервере. Если длина пользовательских данных составляет больше 240 байт, то необходимо выполнять фрагментацию на уровнях выше MAC-уровня.

Sigfox. Длина uplink-кадра в Sigfox имеет длину от 14 до 29 байт. Длина пользовательских данных должна быть меньше 12 байт. При большей длине пользовательских данных, необходимо выполнить фрагментацию данных, однако такая опция не предусмотрена стандартом и может быть реализована на прикладном уровне.

LoRaWAN. Uplink-кадр LoRaWAN начинается с преамбулы, далее следуют заголовок и его контрольная сумма, которые кодируются с наиболее надежной скоростью кодирования $\frac{4}{8}$. Контрольная сумма заголовка отсутствует в кадрах нисходящего направления. Максимальная длина пользовательских данных PL в кадрах восходящего направления LoRaWAN зависит

Таблица 2: Параметры кадров LoRaWAN

SF	T_{up}^{max} , с	T_{down} , с	PL, байт
12	3.121	1.057	51
11	1.708	0.553	51
10	0.688	0.258	51
9	0.667	0.134	115
8	0.697	0.072	242
7	0.396	0.039	242

от коэффициента расширения SF . В кадрах нисходящего потока поле данных остается пустым. В таблице 2 представлены максимальное значение длительности кадров в восходящем направлении T_{up}^{max} и длительность кадров в нисходящем направлении без полезных данных T_{down} и максимальной длины пользовательских данных PL в зависимости от выбранного коэффициента расширения SF .

2.4 Метод доступа к каналу

NB-Fi. В сетях NB-Fi рабочая полоса частот конфигурируется оператором и должна быть не меньше, чем 51,2 кГц в канале восходящего направления и 102,4 кГц в нисходящем канале. Каналы восходящего и нисходящего направлений не должны пересекаться.

Центральная частота передачи в восходящем направлении вычисляется при каждой передаче как функция от скорости, идентификатора устройства и имитовставки данных. Имитовставка с большой вероятностью изменяется при каждой отправке кадра, поэтому центральная частота в канале восходящего направления различна при каждой отправке данных, в том числе повторной передаче и передаче разных кадров из группы. Центральная частота передачи в канале нисходящего направления вычисляется как функция от скорости и идентификатора устройства. Следовательно, сервер, передавая кадры одному и тому же устройству, всегда выбирает одинаковую центральную частоту.

Рассмотрим механизм работы сенсора NB-Fi, работающего в режиме DRX. Рис. 1 иллюстрирует механизм его работы. Через интервал времени T_B после начала отправки кадра, сенсор переходит в режим приема на интервал времени T_L и ожидает подтверждения на переданный пакет. Если в течение «окна приема» подтверждение не поступает, то сенсор выполняет повторную отправку кадра через случайную отсрочку, выбранную из интервала T_{rnd} . Повторные попытки отправки совершаются, пока не будет получено подтверждение или превышен лимит повторных попыток передачи. Значения интервалов T_B , T_L и T_{rnd} , а также длительности кадров T_f указаны в табл. 3.

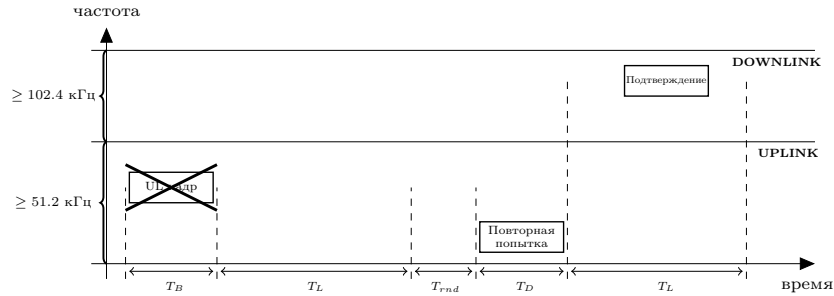


Рис. 1: NB-Fi: механизм передачи данных в режиме прерывистого приема

Таблица 3: Интервалы времени при отправке кадра NB-Fi

Скорость, бит/с	T_f , мс	T_B , мс	T_L , мс	T_{rnd} , мс
50	5760	5900	60000	5000
400	720	740	30000	1000
3200	90	95	6000	100
25600	11,25	15	6000	100

Sigfox. В сетях Sigfox рабочая полоса конфигурируется оператором. Каналы восходящего и нисходящего направлений должны быть разнесены по частоте и иметь ширину 192 кГц каждый.

Рис. 2 иллюстрирует механизм передачи данных в однонаправленном режиме передачи нескольких кадров. Рассмотрим этот режим подробнее. При отправке первого кадра сенсор Sigfox случайным образом выбирает центральную частоту f_1 передачи сигнала в канале uplink. Повторная отправка совершается через интервал времени $10 \leq T_U \leq 2000$ мс на случайно центральной частоте f_2 . Третья передача совершается через тот же интервал T_U на случайной центральной частоте f_3 . Сеанс передачи данных завершается через интервал времени $T_P \geq 10$ мс после отправки последнего кадра.

При использовании однонаправленного режима передачи единичного кадра сеанс отправки данных состоит из единичной отправки кадра на случайной частоте и ожидания в течение интервала времени T_P .

При необходимости выполнить групповую передачу кадров (см. раздел 2.3), так как фрагментация выполняется на прикладном уровне, каждый кадр из группы относится к разным процедурам отправки, то есть для каждого кадра принимается отдельное решение относительно режима работы.

В сетях Sigfox вводится ограничение на количество кадров, которые можно отправить в нисходящем канале в сутки, равное четырем. То есть нисходящий канал не предназначен для постоянной передачи данных, вследствие чего двунаправленный режим не будет рассмотрен в этой работе.

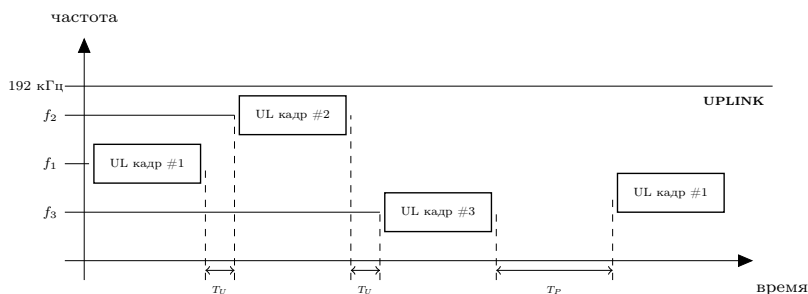


Рис. 2: Sigfox: механизм передачи данных в однонаправленном режиме передачи нескольких кадров

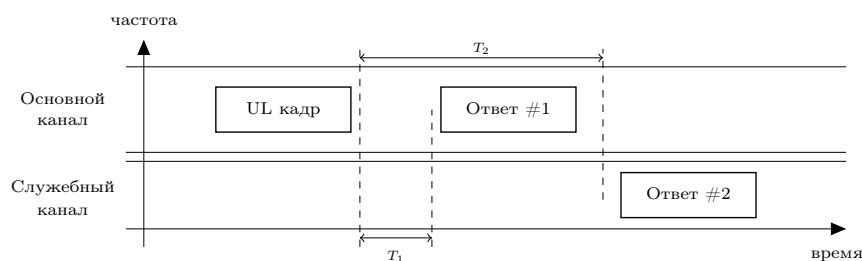


Рис. 3: Механизм передачи данных в LoRaWAN

LoRaWAN. В сетях LoRaWAN базовая станция делит рабочую полосу частот на несколько каналов шириной 125, 250 или 500 кГц. Их количество зависит от региональных ограничений и параметров сети. Некоторые каналы используются для передачи пользовательских данных (основные каналы), несколько каналов зарезервировано для запросов на подключение к базовой станции и один канал используется исключительно для кадров, отправляемых базовой станцией (служебный канал).

Рассмотрим сенсор LoRaWAN класса A. Рис. 3 иллюстрирует механизм его работы. Если на сенсоре есть данные для передачи, то случайным образом выбирается один из основных каналов, в котором отправляется кадр. Через T_1 (по умолчанию $T_1 = 1$ с) после передачи сенсор переходит в режим приема и прослушивает основной канал, в котором был передан кадр, ожидая получить подтверждение на отправленный кадр. Если подтверждение не поступает, то через $T_2 = T_1 + 1$ с после передачи сенсор начинает прослушивать служебный канал, ожидая получить подтверждение в нем. Если в течение одного из «окон приема» сенсор принимает преамбулу, то сенсор не прекращает слушать канал, пока не примет весь кадр. Иначе, сенсор совершает повторную попытку передачи данных через случайную отсрочку, выбранную из интервала $[1; 3]$ с.

3 Обзор литературы

В научной литературе представлено довольно малое количество работ, упоминающих технологию NB-Fi. В статье [17] исследуется метод доступа к каналу в сетях NB-Fi и с помощью имитационного моделирования анализируются доли потерянных и ошибочных пакетов в сети NB-Fi. Кроме того, в научной литературе представлены исследования, анализирующие производительности сетей Sigfox и LoRaWAN отдельно, как, например, в статьях [18] и [19] исследуются производительности сетей Sigfox и LoRaWAN, соответственно. Однако результаты перечисленных статей не могут быть использованы для сравнения технологий, так как сети оперируют в разных сценариях и используют разное количество канальных ресурсов.

В научной литературе присутствуют исследования, анализирующие сети Sigfox и LoRaWAN. Например, в статье [20] сравнивается производительность на канальном уровне технологий Sigfox, LoRaWAN и NB-IoT с точки зрения доли ошибочных пакетов. В данном исследовании сравниваются доли ошибочных пакетов в зависимости от интенсивности трафика передаваемых пакетов с помощью имитационной модели, в которой время моделирования слотировано, и каждый кадр занимает один слот. Так как метод доступа к каналу, используемый в сетях Sigfox и LoRaWAN, является случайным и асинхронным по времени, то результаты данного исследования не применимы для сравнения производительностей сетей рассматриваемых технологий. В работе [21] исследуется зависимость доли ошибочных пакетов от числа сенсоров в сетях технологий Sigfox и LoRaWAN. Авторы приходят к выводу, что технологии Sigfox и LoRaWAN являются перспективными решениями для приложений Интернета вещей, но не сравнивают эти технологии друг с другом.

В работе [11] описываются такие LPWAN-технологии, как LoRaWAN, Sigfox, NB-Fi, Nwave и RPMA. Авторы анализируют численные и качественные характеристики сети, как, например, максимальная скорость передачи данных; максимальное расстояние, при котором возможна передача; количество сенсоров, подключенных к базовой станции и другие. То есть в этой работе сравниваются номинальные параметры сетей, а не производительность на канальном уровне, когда в сети оперирует большое количество сенсоров.

В работе [12] авторы описывают общую инфраструктуру Интернета вещей и, в частности, промышленный Интернет вещей. Также авторы описывают технологии, которые могут использоваться в промышленном Интернете вещей: NB-IoT и LTE-M, использующие лицензируемые частоты, и LoRa, Sigfox и NB-Fi, использующие нелицензируемые частоты. Несмотря на то, что авторы упоминают NB-Fi в качестве перспективного решения для Интернета вещей, в работе не исследована эффективность технологии.

У NB-Fi и Sigfox есть ряд сходств, в том числе метод доступа к каналу, являющийся разновидностьюALOHA, асинхронной по времени и частоте. Математическая модель такого метода доступа к каналу исследуется в работе [22], где авторы с помощью методов стохастической геометрии описы-

вают частотно-временную интерференцию и находят вероятность перебоев в работе и производительность сетей Sigfox и LoRaWAN. Однако описанная модель разработана для сетей, где все кадры имеют одинаковую длительность и занимаемый диапазон по частоте, поэтому модель не применима для сетей NB-Fi, где все сенсоры могут использовать разные скорости передачи данных, то есть кадры могут иметь разную длину по времени и частоте. Кроме того, модель описывает сеть с насыщенным трафиком, что не является характерной особенностью сенсорной сети.

Несмотря на имеющиеся сходства между технологиями LoRaWAN, Sigfox и NB-Fi, результаты работ, исследующих первые две технологии, неприменимы для сетей NB-Fi. Кроме того, подробных сравнений производительностей сетей рассматриваемых LPWAN-технологий в научной литературе не представлено, есть лишь обзорные статьи, сравнивающие номинальные параметры сетей, с помощью которых можно вычислить номинальную производительность на физическом уровне для соединений «точка-точка», однако производительность на канальном и более высоких уровнях для сетей, рассчитанных на большое количество устройств, может не совпадать с номинальной производительностью из-за накладных расходов на передачу данных, межкадровых интервалов и коллизий, возникающих при случайном доступе к каналу, поэтому для ее анализа требуется более подробное исследование. Таким образом, актуальной является задача подробного сравнения производительности сетей NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN и исследования какая технология в каких условиях является наиболее надежной.

4 Исследуемый сценарий и постановка задачи

Рассмотрим следующие параметры сетей NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN. Каждая сеть состоит из 10000 сенсоров, равномерно распределенных в круге радиуса 1 км, базовой станции, расположенной в центре круга, и сервера, реализованного на базовой станции. NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN для каждой скорости передачи данных имеют разную дальность покрытия и разное максимальное число обслуживаемых устройств, однако с данными параметрами сети всех рассматриваемых технологий могут оперировать, используя все доступные скорости. В сетях LoRaWAN присутствует два основных канала и один служебный шириной 125 кГц каждый. Рабочая полоса частот в восходящем канале в сетях NB-Fi и Sigfox равна 250 кГц. Несмотря на то, что в сетях Sigfox ширина восходящего канала должна быть равной 192 кГц, ширина полосы была увеличена, чтобы сетям всех исследуемых технологий было выделено равное количество канальных ресурсов. Данные на сенсоре генерируются через экспоненциально-распределённое время с параметром λ после окончания обслуживания предыдущего кадра. Устройства передают с мощностью 25 мВт. Для вычисления затухания используется модель Окамура-Хата [23]. В канале присутствует тепловой шум, равный -157 дБм в полосе шириной 50 Гц. Передаваемый пакет принимается успешно в сетях NB-Fi и Sigfox, если соотношение мощности сигнала к мощности интерфери-

Таблица 4: Минимальный SINR для приема кадра в сети LoRaWAN

SF	$SINR_{min}$, дБ
12	-20
11	-17,5
10	-15
9	-12,5
8	-10
7	-7,5

рующих сигналов и шума (англ.: Signal to Interference & Noise Ratio, SINR) в используемой полосе частот в течение передачи всего пакета оказывается выше 7 дБ (2 дБ — входной коэффициент шума на базовой станции, 5 дБ — соотношение сигнал-шум для заданной частоты ошибок по битам, равной 10^{-5}) и всегда теряется в противном случае. В сетях LoRaWAN используется модуляция LoRa [24], что позволяет принимать кадр с меньшим SINR, зависящим от выбранного SF. Точные значения указаны в таблице 4. Все сенсоры в сетях NB-Fi и Sigfox используют одинаковую скорость передачи данных, назначаемую при инициализации. Каждому сенсору LoRaWAN при инициализации назначается один из SF с вероятностью, обратно пропорциональной длительности кадра с соответствующим SF, что обеспечивает наиболее равномерное распределение доли ошибочных пакетов в зависимости от расстояния [25].

Рассмотрим три сценария работы сетей.

1. В первом сценарии (далее: *сценарий ненадежной передачи коротких кадров*) длина пользовательских данных во всех кадрах NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN равна 8 байтам. Сенсоры NB-Fi и LoRaWAN работают в режиме без подтверждений. Сенсоры Sigfox работают в однонаправленном режиме передачи единичного кадра. Этот сценарий актуален, если важно передать только наиболее свежие данные, например, при ежедневном сборе данных со счетчиков и сенсоров, когда важно иметь актуальные данные за небольшой промежуток времени, но необязательно успешно получать данные каждый день.

2. Во втором сценарии (далее: *сценарий ненадежной передачи длинных кадров*) длина пользовательских данных при генерации равна 48 байтам. Тогда сенсоры LoRaWAN передают все данные в одном кадре, сенсоры Sigfox — группой из 4 кадров с пользовательскими данными длиной 12 байт, причем интервал между соседними кадрами в группе равняется 10 мс. Так как стандарт Sigfox не предусматривает групповой отправки данных, считаем, что фрагментация данных выполнена на прикладном уровне и интервал между соседними кадрами в группе равняется минимально возможному интервалу T_P , описанному в разделе 2.4. Сенсоры NB-Fi передают данные группой из 6 кадров с пользовательскими данными длиной 8 байт с межкадровым интервалом, равным 10 мс.

3. В третьем сценарии (далее: *сценарий надежной передачи коротких кадров*) длина пользовательских данных, как и в первом сценарии, равна 8 байтам. Сенсоры NB-Fi работают в режиме прерывистого приема, сенсоры LoRaWAN — в режиме класса А, причем каждый переданный кадр NB-Fi и LoRaWAN должен быть подтвержден базовой станцией. Сенсоры Sigfox передают данные в однонаправленном режиме передачи нескольких кадров. Интервалы T_P и T_B (см. раздел 2.4) равны 10 мс. Данный сценарий актуален, например, при сборе статистики, когда важно получить как можно больше информации, собранной устройством, или при отправке уведомлений наиболее надежным способом.

В данной работе ставится задача сравнить сети NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN, работающие по описанным сценариям, по следующим показателям: доля потерянных пакетов (англ.: Packet Loss Rate, PLR).

5 Результаты моделирования

Для описанных сценариев была реализована имитационная модель, с помощью которой исследовалась зависимость PLR сетей NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN от интенсивности трафика при варьировании параметра λ , определяющего интенсивность трафика.

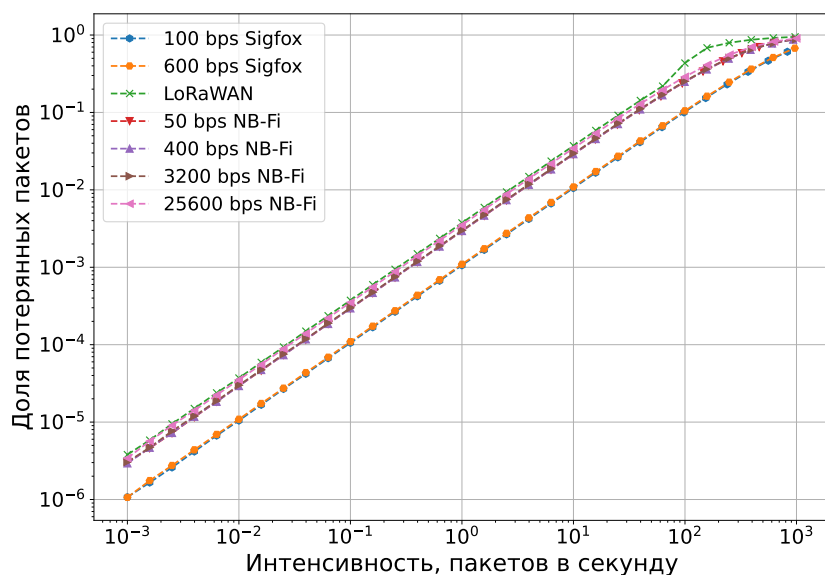


Рис. 4: PLR при ненадежной передаче коротких кадров.

На рис. 4 показана зависимость PLR для сценария ненадежной передачи коротких кадров от интенсивности трафика, где интенсивность трафика — отношение суммарного количества сгенерированных пакетов в сети ко времени эксперимента. Для всех значений интенсивности трафика PLR в сетях Sigfox оказался меньше, чем в сетях NB-Fi и LoRaWAN. Это объясняется тем, что при одинаковых пользовательских данных рассматриваемые технологии добавляют разное количество служебной информации каждый кадр. Для передачи 8 байт данных сенсор NB-Fi отправляет кадр длиной, исключая преамбулу, 256 бит, сенсор Sigfox — 157 бит, сенсор LoRaWAN — 204 бит. Таким образом, кадры Sigfox имеют наименьшие накладные расходы, то есть в сетях Sigfox передача кадра занимает меньше частотно-временных ресурсов, чем в сетях NB-Fi и LoRaWAN, из-за чего вероятность коллизии принимает наименьшее значение. Однако, несмотря на то, что накладные расходы в кадрах LoRaWAN меньше, чем в кадрах NB-Fi, PLR у них находится на одном уровне. Данный результат связан с тем, что сенсоры LoRaWAN и NB-Fi используют разные модуляции (см. раздел 2.1): кадры LoRaWAN при передаче занимают весь канал и имеют накладные расходы меньше, чем кадры NB-Fi, однако, так как возможно одновременное декодирование сигналов с разными SF, а в сетях NB-Fi всеми устройствами используется только одна скорость, то кривые PLR LoRaWAN и NB-Fi практически совпадают.

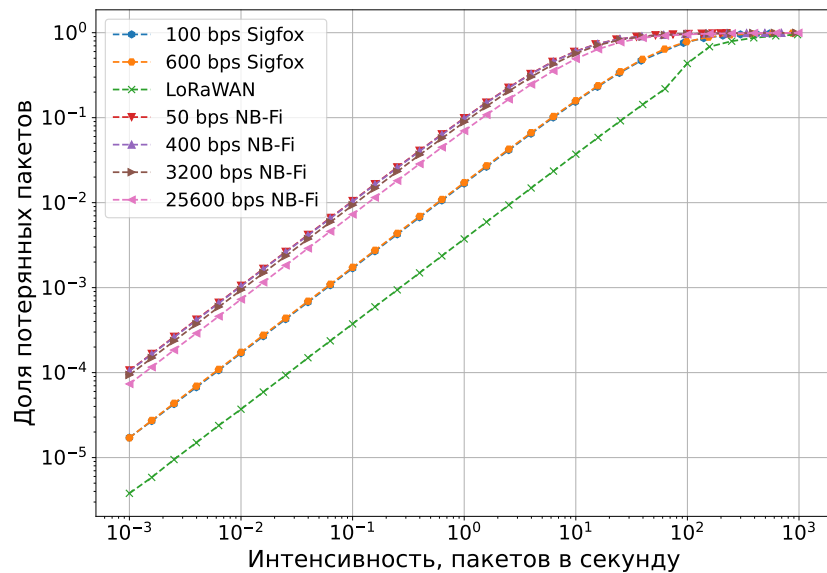


Рис. 5: PLR при ненадежной передаче длинных кадров.

PLR для сценария ненадежной передачи длинных кадров показан на рис. 5. Для всех интенсивностей трафика самый низкий PLR для сетей LoRaWAN, немного выше — Sigfox и самый высокий для NB-Fi. Такой результат объясняется тем, что для передачи 48 байт данных сенсорам LoRaWAN требуется отправить один кадр, сенсорам Sigfox — 4 кадра и сенсорам NB-Fi — 6 кадров. Сенсоры Sigfox и NB-Fi отправляют кадры в группе подряд, следовательно, увеличиваются интервалы и по времени, и по частоте, в которых могут пересечься кадры разных сенсоров и возникнуть коллизия, и поскольку при потере хотя бы одного кадра из группы передача считается неуспешной, то PLR заметно увеличивается при увеличении количества кадров в группе. Таким образом, при передачи больших пользовательских данных наиболее надежной является технология LoRaWAN.

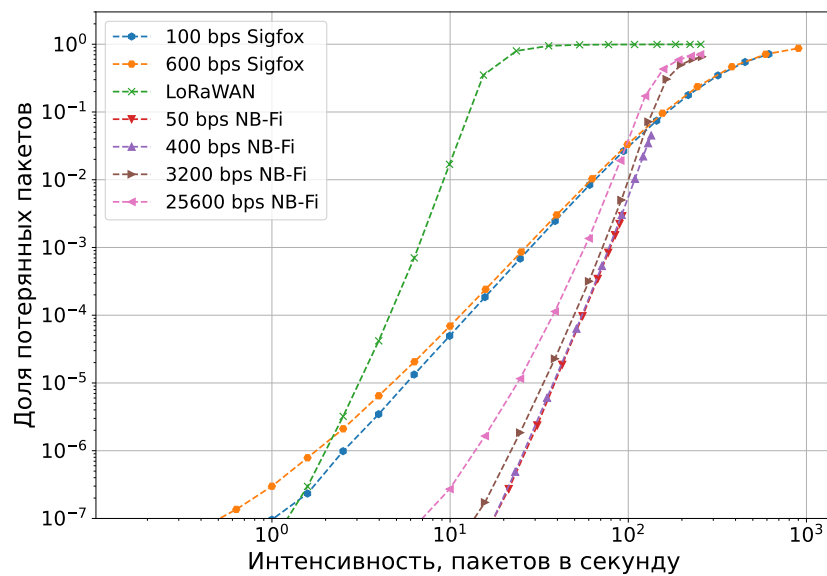


Рис. 6: PLR при надежной передаче коротких кадров.

На рис. 6 показан PLR для сценария надежной передачи коротких кадров. Для интенсивностей меньше 100 пакетов в секунду наиболее низкий PLR наблюдается в сетях NB-Fi, так как после отправки кадра сенсор NB-Fi слушает канал в течение большого промежутка времени относительно длительности кадра и при отсутствии подтверждения совершает повторную попытку через случайную отсрочку, выбранную из интервала, длительность которого намного больше длительности кадра (см. табл. 3), что дает много времени базовой станции для отправки подтверждения и позволяет не на-

гружать канал лишними повторами. Длительности «окна приема» и «окна повторной передачи» у сенсоров LoRaWAN класса A сравнима с длительностью кадра, вследствие чего выполняются лишние повторные попытки передачи при отсутствии подтверждения, что отражается в высоком PLR. Сенсоры Sigfox работают в однонаправленном режиме передачи нескольких кадров, то есть передают при каждой отправке по три кадра с одинаковыми полезными данными, излишне нагружая при этом канал, что отражается в большем PLR. Стоит заметить, что графики всех технологий обрываются на некоторых значениях интенсивности, так как сети приходят в насыщение и не достигают значений интенсивности больше вне зависимости от параметра экспоненциального распределения λ генерации кадров. На значениях интенсивностей приблизительно 100 пакетов в секунду сети NB-Fi со скоростями 50 и 400 бит/с приходят в насыщение и не достигают значений интенсивности трафика выше, а в сетях NB-Fi со скоростями 3200 и 25600 бит/с PLR становится выше, чем в сетях Sigfox. Сети NB-Fi со скоростями 50 и 400 бит/с даже в насыщении имеют PLR ниже, чем сети Sigfox, из-за большой длительности «окна приема» и маленькой вероятности пересечения кадров по частоте. Сети NB-Fi на скоростях 3200 и 25600 бит/с при наступлении насыщения демонстрируют PLR выше, чем сети Sigfox, так как на этих скоростях достаточно высокая вероятность пересечения кадров по частоте и короткий интервал случайной отсрочки.

Подведем итог анализу полученных результатов. Несмотря на сходства рассматриваемых LPWAN-технологий, как, например, метод доступа к каналу в NB-Fi и Sigfox, подтверждение данных в NB-Fi и LoRaWAN, технологии проявляют свои преимущества в разных сценариях. Sigfox оказался наиболее надежным при передаче коротких кадров без подтверждений. LoRaWAN является наиболее надежной при необходимости постоянной передачи большого количества данных. Технология NB-Fi имеет преимущество при необходимости передать данные наиболее надежным способом.

6 Заключение

В данной работе было проведено сравнение таких LPWAN-технологий, как NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN в трех сценариях: ненадежной передаче коротких пакетов данных, ненадежной передаче длинных пакетов данных, надежной передаче коротких пакетов данных. При помощи имитационного моделирования получены зависимости доли потерянных пакетов от интенсивности общего трафика. Анализ полученных результатов выявил, что технологии имеют преимущества в разных сценариях работы сети. Sigfox показал наибольшую надежность при передаче коротких пакетов данных без подтверждений или повторов. LoRaWAN оказалась наиболее надежной для передачи длинных пакетов данных. NB-Fi продемонстрировал наибольшую надежность относительно Sigfox и LoRaWAN при передаче коротких пакетов данных с подтверждениями и повторами. Таким образом, несмотря на сходства, NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN имеют свои преимущества и недостатки,

которые проявляются в разных сценариях. Особенности каждой технологии необходимо учитывать при построении сети. В дальнейшем планируется исследовать энергоэффективность и максимальную дальность передач в сетях NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN.

Список литературы

1. State of IoT 2022: Number of connected IoT devices growing 18% to 14.4 billion globally. — Access mode: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/> (online; accessed: 18 May 2022).
2. LoRaWAN Coverage & Operator Maps. — Access mode: <https://lora-alliance.org/> (online; accessed: 1 February 2022).
3. Sigfox Coverage. — Access mode: <https://www.sigfox.com/en/coverage> (online; accessed: 1 February 2022).
4. WAVIoT — LPWAN solutions for IoT and M2M. — Access mode: <https://www.waviot.com/> (online; accessed: 1 February 2022).
5. ГОСТ Р 70036-2022 Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала (NB-Fi), 2022.
6. Smart electricity meters for flats and houses across all country. — Access mode: <https://waviot.com/projects/apartments/8-000-meters-for-smart-flats-and-houses-metering/> (online; accessed: 1 February 2022).
7. WAVIoT Leasia. — Access mode: https://leasia.fr/?page_id=5719 (online; accessed: 1 February 2022).
8. WAVIoT Distributors. — Access mode: <https://waviot.com/buy/> (online; accessed: 1 February 2022).
9. ПНСТ 516-2021. Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LoRaWAN RU, 2021.
10. Начато публичное обсуждение проекта стандарта протокола Sigfox. — Access mode: http://tc194.ru/sigfox_public.
11. Low Power Wide Area Network Technologies for Smart Cities Applications / Tung Lam Pham, Hoan Nguyen, Huy Nguyen et al. // 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC) / IEEE. — 2019. — P. 501–505.
12. The IoT/IoT device control model based on narrow-band IoT (NB-IoT) / Alexey S Petrenko, Sergei A Petrenko, Krystina A Makoveichuk, Petr V Chetyrbok // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) / IEEE. — 2018. — P. 950–953.
13. Sigfox connected objects: Radio specifications, 2020. — Access mode: <https://build.sigfox.com/sigfox-device-radio-specifications>.
14. LoRaWAN L2 1.0.4 Specification (TS001-1.0.4), 2020. — Access mode: https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-104-specification-package/.
15. RP002-1.0.3 LoRaWAN Regional Parameters, 2021. — Access mode: https://lora-alliance.org/resource_hub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/.
16. Sigfox Link Quality: general knowledge. — Access mode: <https://support.sigfox.com/docs/link-quality:-general-knowledge>.

17. Анализ эффективности метода доступа к каналу в сетях NB-Fi / ДВ Банков, ПА Левченко, АИ Ляхов, ЕМ Хоров // Информационные процессы. — 2021. — Vol. 21, no. 4. — P. 231–243.
18. Lavric Alexandru, Petrariu Adrian I, Popa Valentin. Long range sigfox communication protocol scalability analysis under large-scale, high-density conditions // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — P. 35816–35825.
19. Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey. LoRaWAN modeling and MCS allocation to satisfy heterogeneous QoS requirements // Sensors. — 2019. — Vol. 19, no. 19. — P. 4204.
20. MAC layer-based evaluation of IoT technologies: LoRa, SigFox and NB-IoT / Hussein Mroue, Abbass Nasser, Sofiane Hamrioui et al. // 2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM) / IEEE. — 2018. — P. 1–5.
21. Osman Niemah Izzeldin Mohamed, Abbas Esra Bashir. Performance Evaluation of LoRa and Sigfox LPWAN Technologies for IoT // Academic Journal of Research and Scientific Publishing| Vol. — 2022. — Vol. 4, no. 38.
22. 2D time-frequency interference modelling using stochastic geometry for performance evaluation in low-power wide-area networks / Zhuocheng Li, Steeve Zozor, Jean-Marc Brossier et al. // 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC) / IEEE. — 2017. — P. 1–7.
23. Hata Masaharu. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services // IEEE transactions on Vehicular Technology. — 1980. — Vol. 29, no. 3. — P. 317–325.
24. Semtech A. AN1200. 22 LoRa Modulation Basics // Semtech Application Note. — 2015.
25. Reynders Brecht, Meert Wannes, Pollin Sofie. Power and spreading factor control in low power wide area networks // 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC) / IEEE. — 2017. — P. 1–6.

Исследование алгоритмов выбора сигнально-кодовой конструкции при многоадресной передаче в сетях 5G*

И.В. Лебедева², Р.Р. Юсупов¹, А.Н. Красилов¹

{lebedeva, yusupov}@wireless.iitp.ru, krasilov@iitp.ru

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Аннотация В статье рассматривается задача выбора Сигнально-Кодовой Конструкции (СКК) при многоадресной передаче URLLC-данных (англ.: Ultra-Reliable Low-Latency Communications) в сотовых сетях пятого поколения (5G). Исследуются различные варианты реализации алгоритма выбора СКК, использующие статистику подтверждений доставки данных для различных пользователей. С помощью среды имитационного моделирования NS-3 проведено сравнение различных алгоритмов выбора СКК с точки зрения обеспечения заданной надежности доставки данных и доли используемых частотно-временных ресурсов.

Ключевые слова: 5G, URLLC, OLLA, многоадресные передачи, качество обслуживания

1 Введение

Одной из ключевых областей применения сотовых сетей пятого поколения (5G) является сверхнадежная связь с малой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC). URLLC-приложения генерируют небольшой объем трафика, но предъявляют строгие требования к качеству обслуживания (англ.: Quality of Service, QoS). В частности, задержка при передаче данных должна быть менее 10 мс и доля потерянных пакетов (англ.: Packet Loss Ratio, PLR) менее 10^{-5} . Некоторые URLLC-приложения (например, беспилотный транспорт и автоматизация производства) предполагают многоадресную передачу данных, т.е. передачу одних и тех же данных множеству пользователей. К примеру, в случае включения красного сигнала светофора необходимо своевременно и надежно сообщить данную информацию всем беспилотным автомобилям, находящимся рядом со

* Исследование выполнено в НИУ ВШЭ за счет гранта Российского научного фонда №21-79-10158, <https://rscf.ru/project/21-79-10158/>

светофором. В случае поломки одного из конвейеров на автоматизированной фабрике необходимо с минимальными задержками сообщить об этом остальным конвейерам для избежания дальнейших поломок.

Возможность многоадресной передачи данных в сетях 5G была впервые введена в серии спецификаций Release 17 [1], разработанных комитетом 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Под многоадресной передачей понимается отправка одних и тех же данных группе пользователей с назначением общих частотно-временных ресурсов и единой Сигнально-Кодовой Конструкции (СКК). В случае успешной доставки данных пользователи сообщают об этом базовой станции в специальном служебном канале. Передача считается неуспешной, если хотя бы один пользователь не получил данные. Целью данной работы является исследование эффективности алгоритмов выбора СКК при многоадресной передаче в сетях 5G с множеством антенн на базовой станции. Рассматриваются различные варианты реализации алгоритма выбора СКК, использующие статистику подтверждений доставки данных для различных пользователей. В литературе данный класс алгоритмов получил название Outer Loop Link Adaptation (OLLA) [2].

С помощью имитационного моделирования в среде NS-3 [3] проводится сравнение эффективности рассматриваемых алгоритмов по следующим показателям: доля потерянных пакетов PLR и доля потребляемых частотно-временных ресурсов. Цель алгоритмов выбора СКК – обеспечить минимальное потребление канальных ресурсов при выполнении заданного ограничения на PLR. Отметим, что низкое потребление канальных ресурсов каждым потоком данных позволяет увеличить емкость сети.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 представлен обзор существующих работ, в которых рассматривается задача выбора СКК для многоадресной передачи. В разделе 3 приведено описание алгоритмов выбора СКК и планирования ресурсов. В разделе 4 представлены численные результаты для исследуемых алгоритмов выбора СКК. В разделе 5 приведены выводы.

2 Обзор литературы

Рассмотрим алгоритмы выбора СКК для многоадресной передачи, представленные в литературе. В [4] предлагается не использовать подтверждения доставки данных от пользователей и выбирать фиксированную СКК такой, что 95% процентиль вероятности ошибки декодирования пакета не превышает 1%. Еще один подход, рассмотренный в [4], учитывает оценку качества канала: с увеличением числа пользователей в случае многоадресной передачи у каждого пользователя уменьшается отношение сигнал-шум (англ.: Signal to Noise Ratio, SNR), так как приходится делить мощность передачи базовой станции между большим количеством пользователей. Это, в свою очередь, приводит к выбору более робастной СКК. В [5] рассматривается алгоритм, который для повышения надежности доставки данных снижает СКК при каждой неудачной попытке передачи. При этом, чтобы

обеспечить высокую спектральную эффективность, попытка передачи считается неудачной только тогда, когда количество пользователей, не получивших пакет, превысит определенный порог. Однако авторы не приводят способа выбора этого порога.

В работах [6, 7] для каждого пользователя выбирается СКК в соответствии с его оценкой качества канала. Для передачи данных используется самая низкая из всех выбранных СКК. Для повторной передачи данных используется последняя выбранная СКК. В [8] для выбора СКК используется адаптация алгоритма OLLA, основанного на статистике успешных и неудачных попыток передачи. Для каждого пользователя находятся индивидуальные поправки (корректировки) СКК относительно той, которая оценивается на базе последнего измерения качества канала. Для передачи используется минимальная СКК с учетом текущих поправок для разных пользователей.

Отметим, что рассмотренные выше работы рассматривают случай передачи широкополосных данных, для которых характерна целевая вероятность неудачной попытки передачи равняется 10%. В данной работе рассматривается передача URLLC-данных, для которых целевая вероятность неудачной попытки передачи снижается на несколько порядков, что накладывает ограничения на выбор СКК. Кроме того, в отличие от существующих работ, в данной работе рассматривается случай использования на базовой станции большого числа антенн, что оказывает существенное влияние на флуктуацию качества канала на различных пользователях и, как следствие, на работу алгоритма выбора СКК.

3 Планирование ресурсов и выбор СКК

В данной работе рассматривается одна базовая станция, которая осуществляет многоадресную передачу группе из N URLLC-пользователей без повторных попыток. На базовой станции используется большое количество антенн $N_{TX} \gg 1$ (англ.: Massive MU-MIMO), которое позволяет увеличивать мощность сигнала в определенных направлениях. Попытка передачи считается неудачной, если получено хотя бы одно отрицательное подтверждение (данные не доставлены хотя бы одному пользователю). В данной статье исследуются алгоритмы выбора СКК, целью которых является удовлетворение требования на целевой PLR β и обеспечение минимального объема используемых частотно-временных ресурсов. Под частотно-временными ресурсами подразумеваются группы ресурсных блоков (ГРБ) (англ.: Resource Block Group, RBG) внутри каждого временного слота длительностью 0.5 мс. Каждый слот базовая станция может выделить R ГРБ. Величина R зависит от ширины доступного канала. В данной статье рассматривается канал 100 МГц и $R = 16$.

Для передачи базовая станция формирует единый прекодер, нормированный на мощность передачи P_{tx} , и выделяет для всех пользователей одни и те же ГРБ. Для каждого пользователя i определена матрица канала H_i .

Сигнал на пользователе i считается как $y_i = H_i \times W \times s + n$, где W – матрица прекодера, s – информационный сигнал единичной мощности, n – белый гауссовский шум с мощностью P_n .

В данной работе в качестве базового алгоритма выбора СКК и назначения ГРБ (далее планировщик) используется алгоритм предложенный в работе [9] и кратко описанный ниже. Далее предложены модификации алгоритма назначения СКК, использующие статистику успешных и неудачных попыток передачи от разных пользователей.

3.1 Алгоритм выбора СКК и назначения ресурсов

Рассмотрим подробнее работу базового алгоритма выбора СКК и назначения частотно-временных ресурсов. Под назначением частотно-временных ресурсов подразумевается выбор определенного подмножества ГРБ $B_K = \{RBG_{j_1} \dots RBG_{j_K}\}$ размера K для многоадресной передачи. Алгоритм состоит из следующих шагов.

1. Для каждого пользователя i в каждой ГРБ j рассчитывается SNR. Для подсчета используются матрица канала одноантенного приемника $H_{i,j}$ размером $1 \times N_{TX}$ и матрица прекодера W_j размером $N_{TX} \times 1$:

$$SNR_{i,j} = \frac{\|H_{i,j} \times W_j\|_F^2}{P_n}.$$

Матрица прекодера W_j строится по алгоритму из статьи [10].

2. Далее в каждой ГРБ j для каждого пользователя i определяется СКК:

$$MCS_{i,j} = F_{MCS}(SNR_{i,j}, RBG_j).$$

В функции F_{MCS} используются кривые PLR для разных СКК, и выбирается та СКК, для которой PLR ниже заданного значения.

3. Для каждой ГРБ j выбирается минимальная из СКК пользователей и вычисляется размер транспортного блока T_j , который можно передать в ГРБ j :

$$T_j = F_T(\min_i(MCS_{i,j}), RBG_j).$$

Функция F_T возвращает размер транспортного блока T_j как функцию числа назначенных ГРБ и выбранной СКК согласно формулам, приведенным в спецификации [11].

4. ГРБ сортируются по уменьшению размера транспортного блока T_j .
5. Для каждого K от 1 до L процедура поиска СКК и размера транспортного блока повторяется аналогично пп.1–3, но уже не для одиночного ГРБ, а для подмножества B_K , состоящего из K ГРБ, имеющих наибольшие размеры транспортного блока T_j , найденные в п.1–3. Для каждого K это подмножество ГРБ строится с использованием результата сортировки, полученного в п.4.

$$\begin{aligned} MCS_{i,B_K} &= F_{MCS}(SNR_{i,B_K}, B_K), \\ MCS_{B_K} &= \min_i(MCS_{i,B_K}), \\ T_{B_K} &= F_T(MCS_{B_K}, B_K). \end{aligned}$$

Перебор по K заканчивается, когда для найденного множества B_K размер транспортного блока T_{B_K} превысит размер имеющихся для передачи данных, либо будут назначены все ГРБ, доступные в данном слоте. Полученное множество B_K и есть выделенный для многоадресной передачи частотный ресурс.

3.2 Алгоритмы корректировки СКК на основе OLLA

Описанный выше алгоритм осуществляет выбор СКК на основе доступных на базовой станции измерений качества канала до различных пользователей. Заметим, что качество беспроводного канала может существенно меняться между двумя последовательными измерениями, что, как будет показано в разделе 4, может приводить к высокой вероятности потери пакета. В данной работе для учета возможной флуктуации качества канала используются различные реализации алгоритма корректировки СКК (в литературе данный класс алгоритмов получил название Outer Loop Link Adaptation (OLLA)). Для корректировки СКК алгоритмы класса OLLA используют статистику успешных и неудачных попыток передачи предыдущих пакетов. Ниже рассматриваются различные подходы для выбора и применения корректировки.

OLLA с общей корректировкой Данная реализация использует единую корректировку СКК³ SUB_c сразу на всех пользователей. На основе данных о том, была ли попытка многоадресной передачи успешной или нет (попытка передачи считается неудачной, если получено хотя бы одно отрицательное подтверждение), изменяется значение SUB_c :

$$SUB'_c = \begin{cases} SUB_c - m_c, & \text{успешная попытка;} \\ SUB_c + p_c, & \text{неудачная попытка.} \end{cases}$$

Где m_c , p_c ⁴ – фиксированные параметры алгоритма, связанные с целевым PLR β_c следующим соотношением:

$$\beta_c = \frac{m_c}{m_c + p_c}.$$

Таким образом, когда статистика удачных и неудачных передач соответствует целевому PLR, в среднем SUB_c не меняется. Далее, в зависимости от SUB_c изменяется значение минимальной из всех найденных в п.5 СКК, которая соответствует определенному подмножеству наилучших K ГРБ B_K :

$$MCS'_{B_K} = MCS_{B_K} - [SUB_c].$$

Для передачи выбирается максимальное значение между MCS'_{B_K} и нижней границей множества возможных значений СКК и минимальное значение между MCS'_{B_K} и верхней границей множества возможных значений СКК.

³ Корректировка хранится как действительное число. Однако при ее применении используется только целая часть

⁴ m_c – действительное число; $p_c = 1$

OLLA с индивидуальной для пользователя корректировкой В данной реализации используются отдельные корректировки СКК SUB_i для каждого пользователя. В процессе многоадресной передачи формируются два множества пользователей: те, кто получили и не получили данные. На основе этой информации аналогично OLLA с общей корректировкой изменяется значение SUB_i :

$$SUB'_i = \begin{cases} SUB_i - m, & \text{удачная попытка;} \\ SUB_i + p, & \text{неудачная попытка.} \end{cases}$$

Где m и p ⁵ – фиксированные параметры алгоритма, также, как и в описанном выше алгоритме, связанные с целевым PLR β_i пользователя i следующим соотношением:

$$\beta_i = \frac{m}{m + p}.$$

Рассмотрим каким образом можно выбирать параметр β_i . Простой подход заключается в том, чтобы установить β_i одинаковым для всех пользователей и равным целевому PLR для всей многоадресной передачи, т.е. $\beta_i = \beta_c$. Как будет показано в разделе 4 данный подход может приводить к невыполнению целевого PLR для всей многоадресной передачи по следующей причине. Вероятность неудачной попытки многоадресной передачи определяется вероятностью неудачной попытки передачи хотя бы одного пользователя. В случае, если поступления отрицательных подтверждений (англ: Negative Acknowledgment, NACK) на разных пользователей независимы и существуют пользователи, у которых вероятность получения NACK близка к целевому PLR, то вероятность получения хотя бы одного NACK оказывается выше целевого PLR. Поэтому в работе также рассматривается более консервативный подход для выбора целевого PLR пользователя, учитывающий число пользователей N : $\beta_i = \frac{\beta_c}{N}$ (далее обозначаемый как N-корректировка).

На основе отдельных корректировок пользователей выбор СКК для каждого пользователя в п.5 алгоритма планирования ресурсов осуществляется следующим образом:

$$MCS'_{i,B_K} = MCS_{i,B_K} - [SUB_i].$$

Используется максимальное значение между MCS'_{i,B_K} и нижней границей множества возможных значений СКК и минимальное значение между MCS'_{i,B_K} и верхней границей множества возможных значений СКК.

⁵ аналогично предыдущему алгоритму, m – действительное число; $p = 1$

Таблица 1: Параметры моделирования

Параметр	Значение
Несущая частота	3.6 ГГц
Ширина канала	100 МГц
Количество РБ в ГРБ	16
Всего РБ	256
Множество значений СКК	[0, 28]
Модель канала	3GPP TR 38.901, Urban Macro [12]
Количество антенн на БС/пользователе	64/1
Мощность БС	43 дБм
Высота БС/пользователей	25/1.5 м
Целевой PLR	$10^{-1} - 10^{-3}$
Размер пакета	400 байт
Тип трафика	периодический
Интенсивность URLLC-трафика	1000 c^{-1}

4 Численные результаты

4.1 Постановка экспериментов

Для оценки эффективности алгоритмов выбора СКК, представленных в разделе 3, используется среда имитационного моделирования NS-3. Основные параметры моделирования представлены в таблице 1.

Рассматривается одна базовая станция, в зоне покрытия которой случайно и равномерно размещены N пользователей. На эту группу пользователей осуществляется многоадресная передача без повторных попыток, рассмотрение случая с повторными попытками передачи является направлением дальнейших исследований. В связи с этим в работе рассматриваются целевой PLR до уровня 10^{-3} и предполагается, что меньшая вероятности доставки может быть достигнута за счет использования повторных попыток. Длительность эксперимента составляет 10 секунд, и за время эксперимента осуществляется передача 10^5 пакетов (в случае использования СКК 0 время эксперимента было сокращено до 1 с). Результаты моделирования усреднены по 10 независимым прогонам.

Рассматриваются следующие алгоритмы выбора СКК:

1. Без корректировки
2. СКК 0 (использование всегда самой робастной СКК)
3. Общая корректировка на всех пользователей
4. Индивидуальная корректировка на каждого пользователя
5. Индивидуальная корректировка с учетом количества пользователей N (N -корректировка)

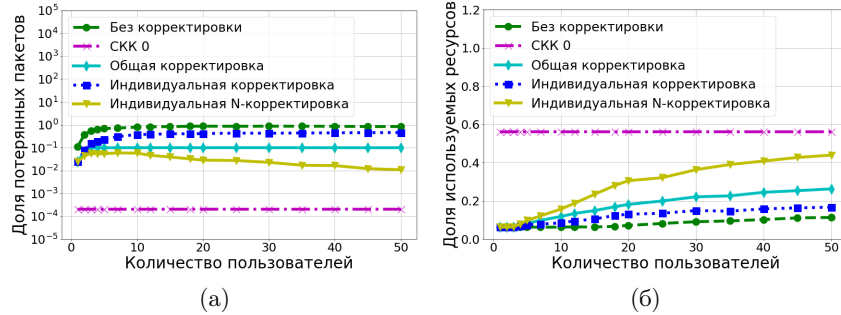


Рис. 1: Целевой PLR = 10^{-1} (а) Доля потерянных пакетов, (б) Доля используемых ресурсов в зависимости от количества пользователей.

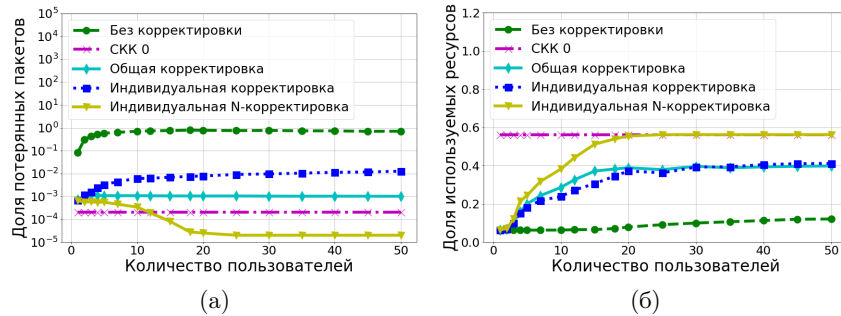


Рис. 2: Целевой PLR = 10^{-3} (а) Доля потерянных пакетов, (б) Доля используемых ресурсов в зависимости от количества пользователей.

Алгоритмы сравниваются по следующим показателям: (а) доля потерянных пакетов PLR и (б) доля используемых частотно-временных ресурсов.

4.2 Анализ результатов

На рис. 1 и 2 представлены результаты моделирования для двух целевых PLR: 10^{-1} и 10^{-3} соответственно.

Из рис. 1(а), 2(а) видно, что алгоритм с общей коррективкой OLLA выполняет требование на PLR и при этом обеспечивает низкое потребление канальных ресурсов (рис. 1(б), 2(б)). Заметим, что выбор СКК 0 выполняет ограничение на целевой PLR, но приводит к значительному потреблению канальных ресурсов.

Рассмотрим алгоритмы OLLA с индивидуальной коррективкой. Из представленных результатов можно видеть, что неучет количества пользователей при выборе индивидуальной коррективки приводит к невыполнению требований на целевой PLR. В то же время OLLA с индивидуальной

N-корректировкой выполняет требования на PLR, но приводит к потреблению слишком большой доли канальных ресурсов. Для объяснения этого эффекта рассмотрим дополнительные результаты, приведенные на рис. 3.

На рис. 3 представлено распределение доли отрицательных подтверждений (NACK) по пользователям в случае алгоритма OLLA с индивидуальной корректировкой с целевым $PLR = 10^{-1}$. Для каждого пользователя доля NACK ниже целевого PLR, однако вероятность неудачной попытки многоадресной передачи определяется вероятностью неудачной попытки передачи хотя бы одного пользователя, т.е. необходимо оценить вероятность поступления хотя бы одного NACK. В случае, если бы поступления NACK на разных пользователей были независимы, эту вероятность можно было бы оценить как $1 - \prod_i (1 - \alpha_i)$, где α_i – вероятность поступления NACK на пользователя i . Отметим, что по результатам моделирования корреляция поступлений NACK для каждой пары пользователей не превышает 0.22, что подтверждает гипотезу о независимости ошибок на разных пользователях. Из рис. 3 видно, что для нескольких пользователей вероятность получения NACK близка к пороговой 10^{-1} . В силу наличия этих пользователей вероятность получения *хотя бы одного* NACK оказывается выше порога 10^{-1} . Эту вероятность можно снизить, учитывая количество пользователей, участвующих в передаче, что, в частности, сделано в алгоритме OLLA с индивидуальной N-корректировкой. Однако в данном алгоритме число пользователей, имеющих вероятность получения NACK близкую к целевой, оценивается сверху как N , в то время как число таких пользователей в реальных экспериментах значительно ниже. В результате, алгоритм с N-корректировкой использует более робастные СКК, что приводит к большому потреблению канальных ресурсов (см. рис. 1(б), 2(б)).

Исходя из вышеизложенного, алгоритм выбора СКК при помощи OLLA с индивидуальной корректировкой не обеспечивает выполнение требования на целевой PLR, тогда как алгоритм OLLA с N-корректировкой потребляет слишком много канальных ресурсов. В свою очередь, алгоритм с общей корректировкой OLLA выполняет требование на PLR и при этом обеспечивает низкое потребление канальных ресурсов.

5 Заключение

В работе рассмотрена проблема эффективного использования канальных ресурсов при многоадресной передаче URLLC-данных в системах сотовой связи пятого поколения с большим числом антенн на базовой станции (в системах Massive MIMO). Рассматривалась задача выбора единой СКК для всех пользователей с выполнением заданных требований к надежности передачи при обеспечении низкого потребления канальных ресурсов. С помощью среды имитационного моделирования NS-3 было проведено сравнение алгоритмов выбора СКК, основанных на использовании статистики об успехе или неудаче предыдущих попыток передачи (алгоритмы класса Outer Loop Link Adaptation, OLLA). В частности, были рассмотрены две

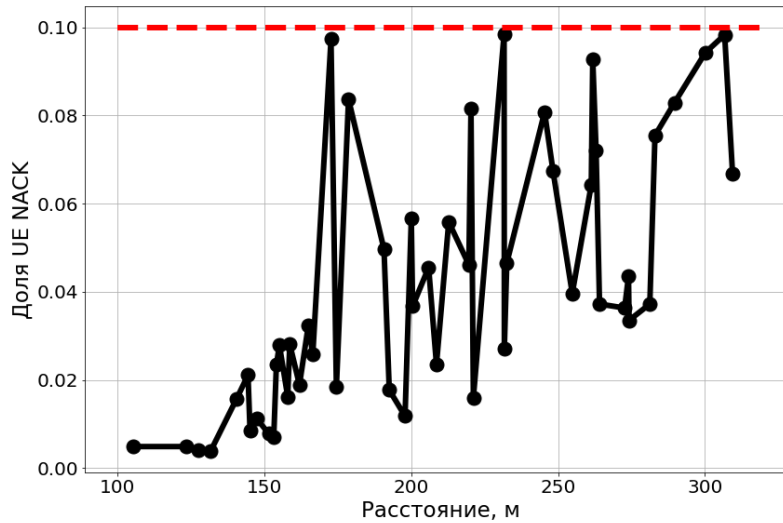


Рис. 3: Распределение долей отрицательных подтверждений на каждом пользователе.

адаптации алгоритма OLLA для многоадресной передачи: (а) с общей корректировкой СКК для всех пользователей, (б) с индивидуальной корректировкой СКК для каждого пользователя. Результаты моделирования показывают, что алгоритм с общей корректировкой СКК обеспечивает выполнение заданных требований к надежности доставки данных при низком потреблении канальных ресурсов. Алгоритм с индивидуальной корректировкой СКК может либо не выполнять требования к надежности, либо выполнять их, но потреблять значительно больший объем канальных ресурсов, чем алгоритм с общей корректировкой СКК.

Список литературы

1. 23.247 3GPP TS. Architectural enhancements for 5G multicast-broadcast services. — 2021.
2. Self-optimization algorithm for outer loop link adaptation in LTE / A Duran, Matías Toril, Fernando Ruiz, Adriano Mendo // IEEE Communications letters. — 2015. — Vol. 19, no. 11. — P. 2005–2008.
3. Network Simulator 3. — Access mode: <https://www.nsnam.org/>.
4. Awada Ahmad, Navrátil David, Säily Mikko. A study on single-cell point-to-multipoint transmission for public safety communications with eMBMS LTE networks // 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference / IEEE. — 2016. — P. 1–6.

5. 5G mixed mode: NR multicast-broadcast services / Eduardo Garro, Manuel Fuentes, Jose Luis Carcel et al. // IEEE Transactions on broadcasting. — 2020. — Vol. 66, no. 2. — P. 390–403.
6. Performance evaluation of LTE MBMS baseline / Li Zhang, Yi Cai, Zhiqiang He et al. // 2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing / IEEE. — 2009. — P. 1–4.
7. Optimization of coverage and throughput in single-cell eMBMS / Li Zhang, Zhiqiang He, Kai Niu et al. // 2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall / IEEE. — 2009. — P. 1–5.
8. Link adaptation and SINR errors in practical multicast multibeam satellite systems with linear precoding / Anxo Tato, Stefano Andrenacci, Eva Lagunas et al. // International Journal of Satellite Communications and Networking. — 2022. — Vol. 40, no. 1. — P. 48–66.
9. Белогаев А.А., Литвинов М.Л., Красилов А.Н. Исследование алгоритмов группировки пользователей при многоадресной передаче данных в многоантенных системах / Сборник трудов конференции "Информационные Технологии и Системы (ИТиС) 2021".
10. Design of single-group multicasting-beamformers / Raphael Hunger, David A. Schmidt, Michael Joham et al. // 2007 IEEE International Conference on Communications / IEEE. — 2007. — P. 2499–2505.
11. 38.214 3GPP TS. NR; Physical layer procedures for data. Release 15.
12. 38.901 3GPP TR. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. — 2017.

Уменьшение сложности моделирования сверхнизкого уровня ошибок МПП-кодов*

Угловский Артём^{1,2}, Алексеев Иван^{1,3}, Щукин Владислав⁴, Куреев
Алексей⁵

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской
академии наук

² Московский физико-технический институт (НИУ)

³ Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В.А.Стеклова
РАН

⁴ Huawei Technologies Co. Ltd.

⁵ Высшая школа экономики (НИУ)

Email: uglovskii@wireless.iitp.ru

Аннотация — Одной из ключевых проблем МПП-кодов является оценка низкого уровня ошибок, возникающего при относительно высоком уровне отношения сигнал – шум (SNR). Данное явление обусловлено в основном замедленным декодированием таких особенных структур как Трэппинг Сет (Trapping Set, TS), которые даже при высоком SNR могут привести к ошибке декодера. Исследование и оценка сверхнизкого уровня ошибок являются важными и нетривиальными задачами при построении хорошей матрицы МПП-кода. Дело в том, что обычная оценка методом Монте-Карло занимает слишком много времени при достаточно низком уровне Frame Error Rate (FER). В этом случае применяется широко известный метод оценки – выборка по значимости (Importance Sampling, IS). В данной статье будет проведено сравнение различных распределений, используемых в методе IS для оценки низкого уровня ошибок МПП-кодов, и будет выбрано наилучшее из представленных распределений.

Ключевые слова — Коды с малой плотностью проверок (МПП-коды), Трэппинг сет, Монте-Карло, Выборка по значимости, низкий уровень ошибок (error floor)

* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

1 Введение

Благодаря своему свойству реализовывать пропускную способность канала, близкую к пределу Шеннона, МПП-коды [1] активно изучаются и используются в последнее время. Они находят свое применение в самых разных коммуникационных системах, в том числе в 5G и в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). Последнее, в виду технических особенностей, требует очень низкого уровня доли ошибочных кадров (англ. Frame Error Rate, FER) в рабочем диапазоне SNR, то есть матрицы для таких систем должны иметь экстремально низкий уровень ошибок на блок порядка 10^{-15} и ниже. Для построения таких кодов в первую очередь необходимо понять, как оценивать столь низкий уровень ошибок, ведь обычной оценкой Монте-Карло тут не обойтись в виду слишком большого времени симуляции. В литературе [2] описано, как с помощью Importance Sampling и Trapping Sets можно оценить сверхнизкий уровень FER потратив существенно меньше времени, однако в основном авторы используют Mean-Shift Importance Sampling (MS-IS) гауссовского распределения и другие распределения не рассматривают (см. [2], [3], [4], [5]). В этой статье будут рассмотрены три разных функции плотности вероятности: Гауссовская, Коши и равномерная. Сравнение различных плотностей будет происходить по нормированному отклонению экспериментальной величины для каждого из рассматриваемых SNR и по среднеквадратичной ошибке логарифма FER.

Дальнейшее изложение организовано следующим образом: в разделе 2 представлено описание основных методов и понятий, используемых в работе, в разделе 3 рассказывается о самом алгоритме оценки и дальнейшем сравнении результатов, раздел 4 приводит результаты проделанных экспериментов, а в разделе 5 приводятся выводы к проделанной работе.

Таблица 1: Список сокращений

МПП-коды	Коды с малой плотностью проверок (Low-Density Parity-Check)
FER	Доля ошибочных блоков (Frame Error Rate)
SNR	Отношение сигнал-шум (Signal to Noise Ratio)
TS	Трэппинг сет (Trapping Set)
IS	Выборка по значимости (Importance Sampling)
MS-IS	IS со сдвигом среднего (Mean-Shift Importance Sampling)
LLR	Логарифм отношения правдоподобия (Log-Likelihood Ratio)

2 Оценка низкого уровня ошибок с помощью выборки по значимости

2.1 Выборка по значимости

В статистике выборка по значимости (IS) – это общий метод оценки свойств случайной величины с конкретной функцией распределения, в то время как выборки генерируются исключительно из распределения, отличного от интересующего.

Этот метод был впервые введен Теуном Клоком и Германом К. ван Дейком в 1978 году (см. [6], [7]). IS является одним из методов уменьшения дисперсии, который используется для улучшения сходимости метода Монте-Карло.

Суть метода IS состоит в следующем: пусть вектор \mathbf{l} – наблюдаемая случайная величина с плотностью $\rho(\mathbf{l})$, а оценить требуется вероятность принадлежности \mathbf{l} некоторому множеству A . Пусть $\mathbb{I}_A(\mathbf{l})$ – индикатор того, что $\mathbf{l} \in A$. Тогда

$$\Pr(\mathbf{l} \in A) = \mathbb{E}_\rho[\mathbb{I}_A(\mathbf{l})] = \int_L \mathbb{I}_A(x)\rho(x)dx, \quad (1)$$

где L – множество значений случайного вектора \mathbf{l} . При практической оценке такой вероятности, эмпирическая величина $\widehat{\Pr}(\mathbf{l} \in A)$ считается по формуле (2)

$$\widehat{\Pr}(\mathbf{l} \in A) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{I}(\mathbf{l}_i), \quad (2)$$

где N – объем выборки, $\{\mathbf{l}_i\}$ – последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин с плотностью $\rho(x)$. Проблема такого метода, называемого методом Монте-Карло (МК), состоит в том, что если $\Pr(\mathbf{l} \in A) \sim 10^{-m}$, то N должно быть порядка 10^{m+1} , что приводит к большому времени симуляции. IS предлагает изменить функцию плотности вероятности так, чтобы \mathbf{l} чаще оказывался из множества A , при этом несмещенная оценка $\Pr(\mathbf{l} \in A)$ может быть переписана следующим образом

$$\Pr(\mathbf{l} \in A) = \int_L \mathbb{I}_A(x) \frac{\rho(x)}{\rho^*(x)} \rho^*(x) dx = \mathbb{E}_{\rho^*}[\mathbb{I}_A(\mathbf{l})w(\mathbf{l})], \quad (3)$$

где $w(x)$ – весовая функция и $w(x) = \frac{\rho(x)}{\rho^*(x)}$, $x \in L$. Соответствующая эмпирическая оценка принимает вид

$$\widehat{\Pr}(\mathbf{l} \in A) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{I}_A(\mathbf{l}_i^*)w(\mathbf{l}_i^*), \quad (4)$$

где $\{\mathbf{l}_i^*\}$ – последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин с плотностью $\rho^*(x)$.

Стоит отметить, что не любую функцию можно брать в качестве ρ^* . Во-первых, очевидно, что она не должна равняться нулю при x таких, что $\mathbb{I}_A(x)\rho(x) \neq 0$. Во-вторых, оценочная функция (4) должна иметь конечную дисперсию, то есть должно выполняться условие

$$\mathbb{E}_{\rho^*}[\mathbb{I}_A^2(\mathbf{l}^*)w^2(\mathbf{l}^*)] < \infty. \quad (5)$$

Оценку (4) можно модифицировать, поделив на мат ожидание весовой функции (см. [8]).

$$\widetilde{\Pr}(\mathbf{l} \in A) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{I}(\mathbf{l}_i^*)w(\mathbf{l}_i^*)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w(\mathbf{l}_i^*)} = \frac{\sum_{i=1}^N \mathbb{I}(\mathbf{l}_i^*)w(\mathbf{l}_i^*)}{\sum_{i=1}^N w(\mathbf{l}_i^*)}. \quad (6)$$

Если выполнено

$$\mathbb{E}_{\rho^*}[w(\mathbf{l}^*)] = \int_L \frac{\rho(x)}{\rho^*(x)} \rho^*(x) dx = \int_L \rho(x) dx = 1, \quad (7)$$

то величина $\widetilde{\Pr}(\mathbf{l} \in A)$ в (6) сходится почти наверное к истинному значению $\Pr(\mathbf{l} \in A)$.

В теории МПП-кодов IS активно используется для оценки экстремально низких вероятностей ошибки декодирования. Действительно, для вычисления FER требуется рассмотреть все возможные вектора логарифмов отношения правдоподобия (LLR) из канала, которые приводят к ошибке декодера, т.е.

$$\mathbb{I}_A(\mathbf{l}) = \begin{cases} 1, & \text{если произошла ошибка при декодировании} \\ 0, & \text{если слово декодировано верно.} \end{cases} \quad (8)$$

Данный метод оценки низкого уровня ошибок МПП-кода обладает одним значительным недостатком – невозможностью построения доверительных интервалов хорошей точности. Действительно, от оценки параметра бернуллиевского распределения (оценка FER) переходят к оценке математического ожидания средним арифметическим, доверительный интервал которого может быть выражен следующей формулой

$$\Pr(\mathbf{l} \in A) \in \mathbb{E}[\mathbb{I}_A(\mathbf{l})] \pm \frac{C}{\sqrt{N}}, \quad (9)$$

где $C > 0$ – некоторая константа. В итоге, для оценки вероятности порядка 10^{-m} требуется порядка $C \cdot 10^{2m}$ реализаций, что значительно больше, чем для Монте-Карло. Однако, практические вычисления показывают, что при правильном выборе функции плотности вероятности $\rho^*(x)$ оценка нужного порядка достигается при сильно меньшем числе реализаций.

2.2 Трэппинг сеты

МПП-коды представляются сильно разреженной матрицей проверок на четность. Пусть определенный МПП-код имеет матрицу H , состоящую из 0 и 1, с n столбцами и m строками. Кодовым словом называется вектор-строка \mathbf{c} , удовлетворяющая условию

$$H\mathbf{c}^T = 0, \quad (10)$$

где операции умножения и сложения производятся в \mathbb{F}_2 .

Матрицу проверок МПП-кода можно представить двудольным графом Таннера с вершинами проверок и переменных. Столбцы в матрице проверок отвечают за так называемые вершины переменных и количество столбцов в точности равно длине кодовых слов. Строки этой матрицы отвечают вершинам проверок и их количество равно количеству уравнений в линейной системе проверок на четность (10). Вершина переменной v_i и вершина проверки c_j называются соседними или соединенными тогда и только тогда, когда в матрице H элемент $h_{ij} = 1$.

Трэппинг сетом, обозначаемым (a, b) , называется множество вершин графа Таннера, состоящее из a вершин переменных и соседних с ними вершин проверок, b из которых имеют нечетное количество вхождений в данный трэппинг сет. Иными словами, трэппинг сетом (a, b) называется вектор-строка \mathbf{v} из 0 и 1, содержащая ровно a единиц и такая, что вектор $H\mathbf{v}^T$ содержит ровно b единиц.

Известно, что при высоком уровне SNR основной вклад в ошибку вносится трэппинг сетами (см. [9, Глава 8]). Метод MS-IS, предложенный в [2], основан на связи трэппинг сетов и низкого уровня ошибок. Именно, рассматривается множество всех трэппинг сетов в матрице и затем распределение LLR меняется ровно на месте трэппинг сета. Таким образом, ошибка возникает в большем числе случаев.

3 Предлагаемый способ

Сначала опишем общий алгоритм оценки низкого уровня ошибок. В качестве нового распределения мы будем рассматривать вектор с плотностью вида:

$$\rho^*(x) = \frac{1}{|T|} \sum_{t \in T} \prod_{v \in t} p_{IS}(x_v) \prod_{v' \notin t} p_{MC}(x_{v'}), \quad (11)$$

где T – множество трэппинг сетов, v – вершина переменной (целое число), $p_{IS}(\cdot)$ – плотность одного из распределений, а $p_{MC}(\cdot)$ – плотность Монте-Карло для АБГШ (аддитивный белый гауссовский шум) канала с ДФМ (Двоичная фазовая манипуляция) модуляцией, то есть нормального распределения с заданной дисперсией канала:

$$p_{MC}(x) = \frac{\sigma}{2\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\sigma^2}{2} (x - 2/\sigma^2)^2 \right\}. \quad (12)$$

Иными словами, каждая компонента вектора LLR имеет нормальное распределение со средним $\frac{2}{\sigma^2}$ и дисперсию $\frac{4}{\sigma^2}$.

Далее весь алгоритм оценки можно разбить на три основные части: нахождение наиболее опасных TS-ов, подбор параметров для каждого из распределений на выбранном множестве SNR-ов и непосредственно сама оценка низкого уровня ошибок с помощью IS. Перейдем к более подробному описанию каждой из трех частей.

Для начала нужно выбрать набор наиболее опасных трэппинг сетов. В качестве возможных TS-ов рассматриваются циклы ограниченной длины. Такой выбор обусловлен следующим наблюдением: наиболее опасными трэппинг сетами являются циклы, объединения циклов и добавленные к ним вершины (см. [10]). Так как предложенный метод является вероятностным, то с некоторой положительной вероятностью будут рассмотрены не просто циклы, но и циклы с прикрепленными ближайшими вершинами, что даст все потенциально опасные трэппинг сетов. Затем с помощью метода MS-IS (см. [11], [12]) выбираются те из них, которые чаще приводят к ошибкам декодера. Такой жадный алгоритм позволяет избавиться от TS-ов, которые точно не оказывают влияния на низкий уровень ошибок. Конечно, среди оставшихся трэппинг сетов будут и те, которые мало влияют на формирование низкого уровня ошибок, но зато среди них точно будут наиболее опасные.

После выбора трэппинг сетов нужно подобрать параметры каждому распределению для выбранного набора SNR. В данной статье, в отличие от других, рассматриваются три различных распределения: нормальное, Коши и равномерное, – формулы которых представлены под номерами (13), (14) и (15) соответственно. Выбор распределений связан с простотой их моделирования и с различным поведением хвостов распределений.

$$\mathcal{N}(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (13)$$

$$\mathcal{C}(x|\mu, \gamma) = \frac{\gamma}{\pi(\gamma^2 + (x - \mu)^2)} \quad (14)$$

$$\mathcal{U}(x|a, b) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & x \in [a; b] \\ 0, & x \notin [a; b] \end{cases} \quad (15)$$

Отметим, что в случае равномерного распределения деление на математическое ожидание весовой функции (6) является обязательным, так как иначе оценка будет смещенной. Действительно, в случае равномерного распределения имеем

$$\mathbb{E}w(\mathbf{l}^*) = \int_L \frac{\rho(x)}{\rho^*(x)} \rho^*(x) dx = \int_D \rho(x) dx,$$

где $D \subset L$ – множество, на котором $\rho^*(x) \neq 0$. Таким образом, $\mathbb{E}w(\mathbf{l}^*) < 1$.

Отметим, что $\rho^*(\mathbf{l}) \neq 0$ почти наверное, если \mathbf{l} имеет плотность ρ^* . Таким образом, плотность ρ^* удовлетворяет всем условиям, введенным ранее.

При переборе параметров могут быть разные критерии остановки. Например, из всех параметров можно выбирать те, которые дают наибольшее количество ошибок при одинаковом числе запусков. Однако использование такого критерия приводит к очень долгому времени подбора параметров, что естественно противоречит поставленной цели. Другим критерием является выбор параметра, при котором достигается установленное значение FER. Алгоритм, основанный на данном методе, при не очень больших FER работает существенно быстрее предыдущего, и при этом обладает удовлетворительными конечными результатами.

В заключении описания предлагаемого нами способа сравнения разных распределений приведем итоговую формулу для весовой функции $w(\mathbf{l}^*)$, а точнее для обратного ее значения $w^{-1}(\mathbf{l}^*)$

$$w^{-1}(\mathbf{l}^*) = \frac{\rho^*(\mathbf{l}^*)}{\rho(\mathbf{l}^*)} = \frac{1}{|T|} \sum_{t \in T} \prod_{v \in t} \frac{p_{IS}(\mathbf{l}_v^*)}{p_{MC}(\mathbf{l}_v^*)}. \quad (16)$$

4 Результаты

Известно, что константа C в формуле доверительного интервала (9) прямо пропорциональна корню из дисперсии. Таким образом, для уменьшения доверительного интервала требуется уменьшить дисперсию. Именно из-за этого в качестве одной из оценок качества распределения выберем дисперсию случайной величины $\mathbb{I}_A(\mathbf{l}^*)w(\mathbf{l}^*)$. Более точно, будет использована модифицированную оценку дисперсии (см. [5]), принимающая вид

$$\gamma(\rho^*) = \frac{1}{N} \left(\frac{\mathbb{E}_{\rho^*}[\mathbb{I}^2(\mathbf{l}^*)w^2(\mathbf{l}^*)]}{\widehat{\text{Pr}}^2(\mathbf{l} \in A)} - 1 \right). \quad (17)$$

Отметим, что статистика $\gamma(\rho^*)$ является инвариантной относительно умножения весовой функции на константу. Таким образом, оценку можно использовать и для равномерного распределения.

Также оценим среднеквадратичную ошибку логарифмов FER для значений SNR, у которых будет вычислено истинное значение ошибки декодирования. Это позволит точнее оценить качество метода при малых значениях SNR. Именно, будет использована следующая статистика

$$\text{MSE} = \sum_{\text{SNR}} (\log \widetilde{\text{Pr}}(\mathbf{l} \in A) - \log \text{Pr}(\mathbf{l} \in A))^2.$$

При моделировании использовался АБГШ канал с ДФМ модуляцией и Min-Sum декодер (для более подробной информации о Min-Sum декодере см. [13]).

Для представления результатов были выбраны две матрицы. Первая матрица известная и хорошо изученная регулярная с размером (96, 48) (см. [14]). Вторая матрица – квазициклическая нерегулярная матрица размером (17664, 3072), такая что в соответствующем графе Таннера нет циклов длины 4 (протоматрица получена из матрицы стандарта 802.3sa). Интервалы SNR выбирались так, чтобы в начале интервала можно было провести оценку методом Монте-Карло, и внутри этого интервала кривая FER от SNR выходила на низкий уровень ошибок. Оценка FER методом IS производилась при числе реализаций $N = 10^6$. На рис.1 изображены зависимости FER от SNR для первой матрицы (96, 48). Видно, что все распределения так или иначе приближают низкий уровень ошибок, причем довольно неплохо. Однако более точная и правдоподобная оценка у равномерного распределения (рис.1c).

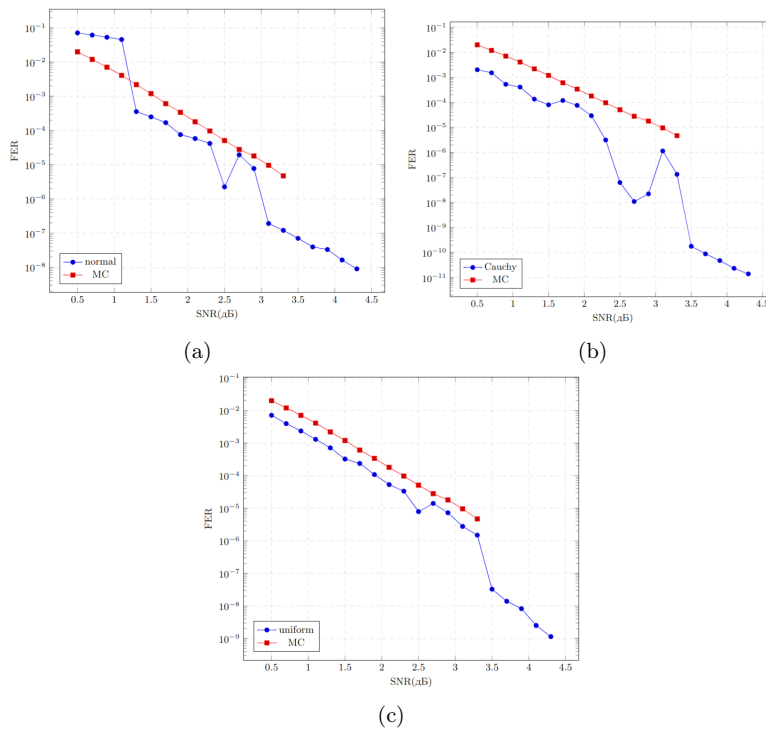


Рис. 1: Результаты моделирования зависимости FER от SNR матрицы (96, 48) методами Монте-Карло и IS для (a) нормального, (b) Коши и (c) равномерного распределений.

Среднеквадратичная ошибка приводится в Таблице 2. Из таблицы видно, что наименьшая квадратичная ошибка представлена у равномерного распределения, наибольшее значение – у Коши.

Таблица 2: Среднеквадратичная ошибка для матрицы (96, 48)

Распределение	Равномерное	Коши	Нормальное
Среднеквадратичная ошибка	3.83	42.41	12.31

Далее на графике 2 представлено распределение статистик $\gamma(\rho^*)$ для трех распределений при различных значениях SNR. Как можно заметить наименьшее значение выборки почти на всем рассматриваемом интервале для нормального распределения.

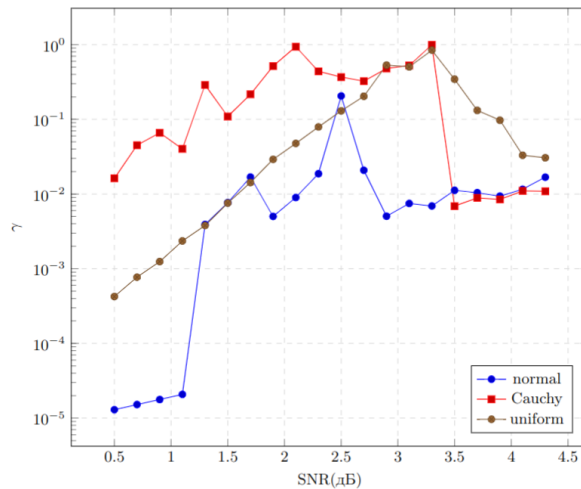


Рис. 2: График статистики $\gamma(\rho)$ для трех распределений для матрицы (96, 48).

При попытке оценить ошибку декодирования у матрицы (17664, 3072) рис.3 распределения гауссовое и Коши, рис.3а и рис.3б соответственно, выдали нереалистичные результаты, в то время как равномерное распределение на рис.3с показало хорошую оценку низкого уровня ошибок на уровне $\sim 10^{-7}$.

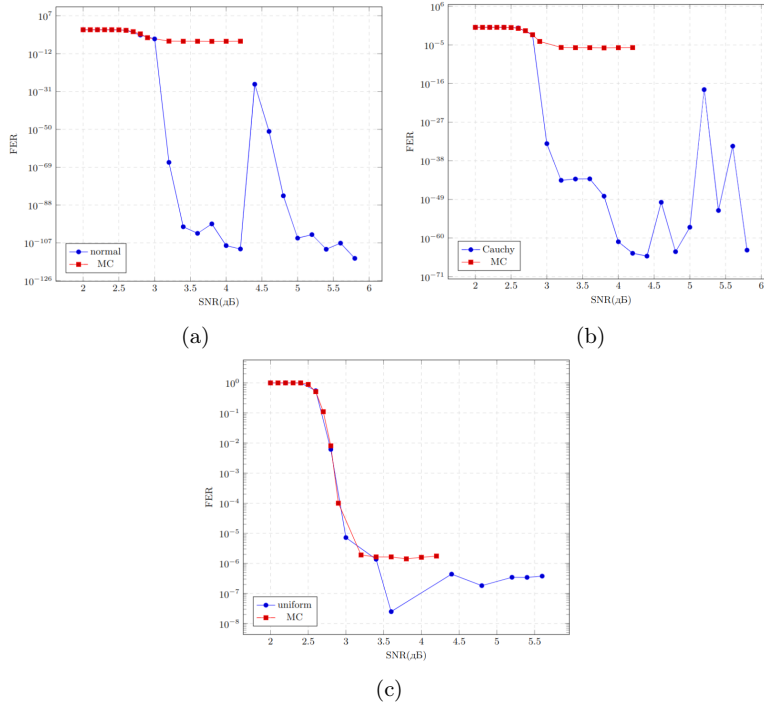


Рис. 3: Результаты моделирования зависимости FER от SNR матрицы (17664, 3072) методами Монте-Карло и IS для (a) нормального, (b) Коши и (c) равномерного распределений.

Среднеквадратичная ошибка приводится в Таблице 3. Из таблицы видно, что наименьшая квадратичная ошибка представлена у равномерного распределения, наибольшее значение – у нормального.

Таблица 3: Среднеквадратичная ошибка для матрицы (17664, 3072)

Распределение	Равномерное	Коши	Нормальное
Среднеквадратичная ошибка	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$6.7 \cdot 10^{-5}$

Далее на графике 4 представлено распределение статистик $\gamma(\rho^*)$ для трех распределений при различных значениях SNR. Как можно заметить, наименьшее значение выборки для равномерного распределения на небольших значениях SNR, а затем разница нивелируется и выделить лучшее распределение невозможно.

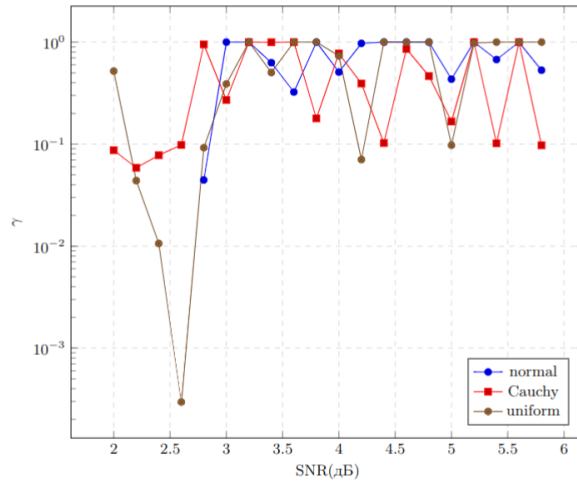


Рис. 4: График статистики $\gamma(\rho)$ для трех распределений для матрицы (17664, 3072).

5 Выводы

В данной работе был проведен сравнительный анализ трех методов оценивания экстремальных значений ошибки декодирования, основанных на выборке по значимости. Для оценки качества использовались два критерия – модифицированное нормированное отклонение и среднеквадратичная ошибка. При изучении двух матриц было получено, что лучшим по среднеквадратичному отклонению всегда являлось равномерное распределение. Нормированное отклонение часто показывало близкие результаты для распределений, при малых значениях SNR выделялось или равномерное, или нормальное. Однако, на графиках заметно, что лучше всех низкий уровень ошибок приближается равномерным распределением. Для матрицы (17664, 3072) оценка низкого уровня ошибок с помощью нормального распределения и распределения Коши является абсолютно нереалистичной. Отсюда напрашивается вывод, что выбор нормированного отклонения как критерия является неудачным. Скорее всего, это связано с тем, что доверительный интервал большей точности для данной статистики имеет более сложную структуру, мало зависящую (или независимую) от дисперсии случайной величины.

Список литературы

1. Gallager R. Low-density parity-check codes // IRE Transactions on Information Theory. — 1962. — Vol. 8, no. 1. — P. 21–28.
2. A General Method for Finding Low Error Rates of LDPC Codes. — 2006. — May. — arxiv : 0605051v1.
3. Cavus Enver, Haymes Charles L., Daneshrad Babak. Low BER Performance Estimation of LDPC Codes via Application of Importance Sampling to Trapping Sets // IEEE Transactions on Communications. — 2009. — July. — Vol. 57, no. 7. — P. 1886–1888.
4. Importance Sampling Based Software Kit for LLR BP Decoding Simulation / Likhobabin Evgeny, Volkov Igor, Zavertkin Konstantin, Ovinnikov Aleksei, and Vityazev Vladimir // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). — IEEE. — 2019. — June.
5. Neshastegaran Peyman, Banihashemi Amir H., Gohary Ramy H. Error Floor Estimation of LDPC Coded Modulation Systems Using Importance Sampling // IEEE Transactions on Communications. — 2021. — May. — Vol. 69, no. 5. — P. 2784–2799.
6. Kloek T., van Dijk H. K. Bayesian Estimates of Equation System Parameters: An Application of Integration by Monte Carlo // Econometrica. — 1978. — Jan. — Vol. 46, no. 1. — P. 1–19.
7. Kloek T., van Dijk H. K. Experiments with some alternatives for simple importance sampling in Monte Carlo integration // Bayesian Statistics. — 1984. — Feb. — Vol. 2.
8. Reuven Y. Rubinstein Dirk P. Kroese. Simulation and the Monte Carlo method. — John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2017.
9. Johnson Sarah J. Iterative Error Correction. Turbo, Low-Density Parity-Check and Repeat–Accumulate Codes. — Cambridge University Press, 2010.
10. Kim Kyung-Joong, Myung Seho, Jeong Hongsil. Lowering error floors by removing dominant trapping sets of low-density parity-check codes for broadcasting systems // 2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. — 2015. — P. 1–3.
11. Sakai Takakazu, Shibata Koji. Fast BER estimation of LDPC codes // 2010 International ITG Conference on Source and Channel Coding (SCC). — 2010. — P. 1–6.
12. Zhu Mingyang, Jiang Ming, Zhao Chunming. Error Floor Estimation of QC-LDPC Coded Modulation With Importance Sampling // IEEE Communications Letters. — 2021. — Vol. 25, no. 1. — P. 28–32.
13. Chen J., Fossorier M.P.C. Density evolution for two improved BP-Based decoding algorithms of LDPC codes // IEEE Communications Letters. — 2002. — Vol. 6, no. 5. — P. 208–210.
14. MacKay D. Encyclopedia of sparse graph codes. — Available: <http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/codes/EN/C/96.3.964>.

Математическая модель периодического окна ограниченного доступа со слотами произвольной длительности*

М.В. Шлапак^{1,2}, Р.Р. Юсупов¹, А.И. Ляхов¹

{shlapak, yusupov}@wireless.iitp.ru, lyakhov@iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский
университет)

Аннотация Рост числа устройств Интернета вещей в рамках одной сети Wi-Fi приводит к повышению конкуренции за доступ к каналу, снижающей производительность сети. Описанный в стандарте IEEE 802.11ah механизм периодического окна ограниченного доступа PRAW (англ.: Periodic Restricted Access Window) позволяет решить эту проблему. Однако для выбора параметров механизма с учетом особенностей сценария и требований к качеству обслуживания возникает необходимость в построении аналитической модели. В данной статье впервые строится аналитическая модель механизма PRAW с RAW-слотами произвольной длительности, учитывающая возможность передачи пакета за несколько периодов и позволяющая оценивать такие важные для сетей Интернета вещей метрики, как среднюю задержку и среднее энергопотребление в расчете на один успешно переданный пакет. Для оценки точности аналитической модели использовалась имитационная модель.

Ключевые слова: Интернет вещей, пропускная способность сети, RAW, IEEE 802.11ah

1 Введение

С ростом потребностей человечества в упрощении повседневной жизни и оптимизации производственных процессов, основанных на цифровизации окружающего пространства, растет количество всевозможных умных устройств, работающих в рамках концепции Интернет вещей, т.е. способных обмениваться данными. Однако увеличение числа сенсоров в рамках одной сети Wi-Fi приводит к повышенной конкуренции за доступ к каналу,

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00846

которая, ввиду использования метода случайного доступа, сопровождается увеличением числа коллизий и, вследствие этого, ростом таких важных для сетей Интернета вещей показателей, как среднее энергопотребление и средняя задержка доставки пакета.

Одним из методов решения проблемы повышенной конкуренции за доступ к каналу стал описанный в стандарте IEEE 802.11ah механизм окна ограниченного доступа RAW (англ.: Restricted Access Window). С помощью этого механизма точка доступа делит все станции на одну или несколько групп, каждой из которых соответствует заранее определенный ограниченный интервал времени, внутри которого только станции, входящие в эту группу, могут передавать свои данные. Такой интервал времени называется RAW-слотом. В целях экономии канальных ресурсов RAW-слоты объединяются в непрерывный интервал времени RAW — окно ограниченного доступа. Это окно может быть одиночным или периодическим. Таким образом, механизм RAW снижает конкуренцию за доступ к каналу путем строгого ограничения количества станций, которым разрешено передавать свои данные в течение ограниченного интервала времени. Станции, которым выделен RAW-слот, могут не передавать данные вне его, что дает им возможность находиться в спящем режиме и экономить энергию.

Внутри своего RAW-слота станции передают данные с помощью метода случайного доступа к каналу EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access), базирующегося на методе CSMA/CA (англ.: Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance). Когда станция получает пакет, она инициализирует свой счетчик отсрочки случайным целым числом, выбранным равновероятно из интервала $[0; W_0 - 1]$, где W_0 — заданный минимальный размер конкурентного окна. После этого станция начинает слушать канал, уменьшая счётчик отсрочки на единицу каждый раз, когда канал был пуст за время интервала T_e . Если канал занят, станция сначала ждет его освобождения и только потом декрементирует свой счетчик отсрочки. При достижении счетчиком отсрочки нулевого значения станция предпринимает попытку передачи пакета. Если она оказалась неуспешной, то инкрементируется счетчик попыток передачи пакета, изначально имевший значение ноль. Счетчик отсрочки в то же время получает новое случайное целочисленное значение, выбранное равновероятно из диапазона с увеличенным вдвое (если не было достигнуто максимальное значение W_{max}) размером конкурентного окна. Таким образом, после каждой неуспешной попытки передачи пакета i , совершенной в данном RAW-слоте, размер конкурентного окна имеет вид:

$$W_i = \begin{cases} W_0, & i = 0, \\ \min\{W_{max}, 2W_{i-1}\}, & 0 < i \leq R. \end{cases}$$

Если счетчик попыток передачи пакета достигает максимального допустимого значения R , то пакет отбрасывается. Особенностью доступа к каналу в RAW-слотах является то, что на момент начала каждого своего RAW-слота станция сбрасывает размер конкурентного окна до минимального значения W_0 вне зависимости от того, есть ли у нее пакет для передачи

и сколько попыток передачи для этого пакета уже было совершено. Станции с нулевым значением счетчика отсрочки предпринимают попытку передачи только в том случае, если время, затраченное на нее, не выходит за границы выделенного RAW-слота.

Поскольку в стандарте IEEE 802.11ah описывается механизм RAW в общем виде, возникает необходимость в индивидуальном подборе его параметров, наилучшим образом соответствующих особенностям того или иного сценария. Так в сценарии доставки одного пакета от заранее выбранной произвольным образом станции или всех пакетов от группы сенсоров в пределах одного RAW-слота [1] были найдены вероятности этих успешных передач в зависимости от длительности RAW-слота при условии того, что каждая станция имела ровно один пакет для передачи. В работе [2] этот метод был расширен на более общий случай трафика, но все так же рассматривался процесс передачи только в пределах одного RAW-слота. Случай, когда пакет может передаваться в нескольких периодах RAW, был рассмотрен в [3], однако сценарий этой работы подразумевал короткие RAW-слоты, которых хватало максимум на одну попытку передачи пакета. В данной работе **впервые** исследуется механизм PRAW с RAW-слотами произвольной длительности, позволяющий совершить несколько успешных попыток передач внутри RAW-слота, а также передавать один пакет за несколько RAW-периодов.

В **результате** этого исследования построена математическая модель механизма PRAW, использующего RAW-слоты произвольной длительности, и проведена оценка ее точности путем сравнения с имитационной моделью по таким метрикам производительности сети, как средняя задержка доставки пакета и средняя энергия, потребляемая одной станцией в расчете на один успешно переданный пакет. В дальнейшем данная модель может быть применена на практике в задачах минимизации потребляемого канального ресурса, времени доставки пакета или среднего энергопотребления в расчете на один успешно переданный пакет.

Оставшаяся часть статьи состоит из обзора предыдущих работ, написанных по этой теме (раздел 2), сценария, описанного в разделе 3, аналитической модели, которая представлена в разделе 4, и оценки ее точности, проводившейся в разделе 5. В разделе 6 представлены выводы.

2 Обзор литературы

Стандарт IEEE 802.11ah в целом и описанный в нем новый механизм RAW в частности являются объектами исследования многих работ, однако только некоторые из них посвящены анализу RAW в сценариях с ненасыщенным трафиком. Так в [1] исследовались бесконечные RAW-слоты при условии того, что каждая станция имеет ровно один пакет для передачи, и была найдена длительность RAW-слота, соответствующая заданной вероятности, с которой заранее выбранная произвольным образом станция передаст пакет или все станции передадут свои пакеты. В [2] этот сценарий был расширен на более общий случай трафика, в котором пакеты на станции

генерируются пачками, размер которых подчиняется геометрическому распределению, а параметры RAW подбирались исходя из оптимальных значений пропускной способности и энергопотребления. Однако процесс передачи пакета в [2] по-прежнему ограничивался одним интервалом RAW.

Сценарий доставки кадров от каждого сенсора за ограниченное время и с низким энергопотреблением был рассмотрен также в [4–6], однако вероятность попытки передачи пакета в моделях из этих работ не менялась с течением времени в RAW-слоте. Такое допущение приводило к существенным ошибкам.

В работе [3] исследовался механизм PRAW с короткими RAW-слотами, допускающими только одну попытку передачи пакета, причем в отличие от работ [1, 2], каждый пакет мог быть передан в течение нескольких RAW при разреженном трафике. Сценарий текущей работы подразумевает RAW-слоты произвольной длительности, а аналитическая модель может использоваться для подбора оптимальной (в смысле потребления канального ресурса) длины RAW-слота в зависимости от интенсивности трафика и числа станций.

В [3] модель представляла собой цепь Маркова с состоянием, описываемым числом сенсоров, имеющих пакет для передачи на начало RAW-слота. Так как по окончании короткого слота это число могло снизиться не более чем на единицу, это обуславливало простой вид матрицы переходных вероятностей. По окончании длинного RAW-слота число сенсоров, имеющих пакет для передачи, может снижаться на более значительную величину. Данная величина зависит от числа успешно переданных пакетов, для нахождения вероятностного распределения которого будем использовать метод анализа переходного процесса в RAW-слоте, разработанный в [1].

Таким образом, учет периодической структуры механизма RAW, позволяющего каждой станции передавать пакет за несколько периодов, и использование RAW-слотов произвольной длительности (успешных попыток передач внутри одного RAW-слота может быть несколько), отличает данную работу от [1–3] и обосновывает новизну предлагаемой аналитической модели PRAW с RAW-слотами произвольной длительности, необходимой для исследования метрик производительности сети в более широком диапазоне параметров RAW.

3 Сценарий

Исследуется сеть Wi-Fi, состоящая из N станций, подключенных к одной точке доступа. Станция считается активной, если у неё есть пакет для передачи. После того, как станция стала неактивной, следующий пакет на ней генерируется через интервал времени, длина которого распределена экспоненциально с параметром λ . Точка доступа реализует механизм периодического окна ограниченного доступа PRAW, выделяя периодический интервал RAW, состоящий из M RAW-слотов, выделенных N станциям. В каж-

дом RAW-слота находится N_m станций, где индекс m — порядковый номер группы. Таким образом,

$$\sum_{m=1}^M N_m = N.$$

Длительность RAW-слота равна T_{slot} , число успешных попыток передач внутри него ограничено числом станций, имеющих доступ к каналу во время RAW-слота, и его длительностью, а с момента генерации пакета до момента его успешной передачи может пройти несколько периодов RAW. В сценарии предполагается отсутствие внешних помех, т.е. неудачные попытки передач происходят только из-за коллизий, под которыми подразумевается одновременная передача пакетов двумя и более станциями. Длительность одного RAW-периода равна T_{per} .

Так как одним из требований приложений Интернета вещей является уменьшение энергопотребления без потери в других метриках производительности, предполагается, что станции вне своего RAW-слота, а также неактивные станции, будут находиться в спящем режиме и экономить энергию. Станции также уходят в спящий режим, если обнаруживают, что времени, остающегося до конца RAW-слота, недостаточно для совершения попытки передачи. Кроме того, предполагается, что в RAW-слоте передаются только пакеты, поступившие до его начала.

4 Аналитическая модель

Для дальнейшего описания модели будем использовать понятие «виртуального слота», введенное в [7, 8]. Под ним подразумевается временной интервал между двумя последовательными изменениями счётчика отсрочки. Виртуальный слот может быть успешным (если за этот интервал была совершена успешная попытка передачи), коллизионным (если попытка закончилась коллизией) или пустым (если попыток передачи не было) и, соответственно, иметь длину T_s , T_c или T_e . Разделение на виртуальные слоты позволяет описать поведение системы станций посредством цепей Маркова с дискретным временем, что будет более подробно описано в разделе 4.1.

Так как станции совершают попытку передачи исключительно внутри RAW-слота без пересечения его границ, попытки передач групп станций, назначенных разным RAW-слотам, могут рассматриваться независимо друг от друга, поэтому, как и в статье [3], достаточно разработать аналитическую модель для одного RAW-слота и обобщить её на случай нескольких RAW-слотов.

Отметим также, что в данной аналитической модели счетчик повторных попыток передачи пакета сбрасывается вместе с размером конкурентного окна в начале каждого RAW-слота, что при рассматриваемых длительностях RAW-слота делает вероятность достижения R пренебрежительно малой.

4.1 Одиночный RAW-слот

Для одиночного RAW-слота положим $M = 1, N_m = N$.

Рассмотрим для начала некоторые аналитические выкладки статьи [1], использующиеся в этой работе, затем перейдем к определению стационарного процесса в системе, выражающего распределение числа активных станций на начало RAW-слота, и выведем с помощью него такие метрики производительности сети, как среднюю задержку и среднее энергопотребление в расчете на один успешно переданный пакет.

В работе [1] исследовались два процесса, описывающие передачу пакетов N станциями (в начальный момент времени очереди каждой станции содержат ровно один пакет, и затем новые пакеты на станции не генерируются), поглощающим состояниям которых соответствовали два события:

- A. произвольно выбранная станция совершила успешную попытку передачи,
- B. все N активных станций совершили успешную попытку передачи.

Для них вводились Марковские цепи с дискретной единицей времени — виртуальным слотом, именуемые как процесс А и процесс В.

Состояние процесса А обозначалось как (t, c, s, r) , где t — общее количество виртуальных слотов, прошедших с начала RAW-слота, среди которых c коллизийных и s успешных, а r — количество повторных попыток передач пакета для выбранной станции, не превышающее R . Количество пустых виртуальных слотов для состояния со временем t можно найти как $t - c - s$. Состояние процесса В обозначалось как (t, c, s) .

Далее вводилось состояние (t, r) , которое обозначало нахождение произвольно выбранной станции в состоянии с числом виртуальных слотов t и количеством попыток передачи r . Вероятность совершения попытки передачи выбранной станцией из данного состояния, $Pr(TX|t, r)$, находилась по формуле:

$$Pr(TX|t, r) = \frac{a(t, r)}{b(t, r)},$$

где

$$a(t, r) = \begin{cases} \frac{1}{W_0}, & r = 0, 0 \leq t < W_0, \\ 0, & r = 0, t \geq W_0, \\ 0, & r \geq R, \\ \frac{1}{W_r} \sum_{i=\max\{t-W_r, 0\}}^{t-1} a(i, r-1), & 0 < r < R, \end{cases}$$

$$b(t, r) = \begin{cases} 1 - \sum_{i=0}^t a(i, r), & r = 0, \\ \sum_{i=0}^t (a(i, r-1) - a(i, r)), & r > 0. \end{cases}$$

и вероятность совершения попытки передачи из состояния (t, c, s) :

$$Pr(TX|t, c, s) = \frac{\sum_{r=0}^c Pr(TX|t, r)Pr(t, c, s, r)}{\sum_{r=0}^c Pr(t, c, s, r)},$$

где $Pr(t, c, s, r)$ — вероятность для процесса А находиться в состоянии (t, c, s, r) .

Оба процесса начинаются из состояний $(0, 0, 0, 0)$ (для А) и $(0, 0, 0)$ (для В). Рассмотрим переходные вероятности для каждого из процессов:

- А. Из состояния (t, c, s, r) возможно пять переходов:
1. В состояние $(t + 1, c, s, r)$ с вероятностью P_e^- , что соответствует пустому виртуальному слоту.
 2. В поглощающее состояние с вероятностью P_s^+ , что соответствует успешной попытке передачи для заданной станции.
 3. В состояние $(t + 1, c, s + 1, r)$ с вероятностью P_s^- , что соответствует успешной попытке передачи для другой станции.
 4. В состояние $(t + 1, c + 1, s, r + 1)$ с вероятностью P_c^+ , что соответствует коллизии выбранной станции, которое будет являться поглощающим при $r + 1 = R$.
 5. В состояние $(t + 1, c + 1, s, r)$ с вероятностью P_c^- , что соответствует коллизионному виртуальному слоту без попытки передачи для заданной станции.
- В. Из состояния (t, c, s) возможны три перехода:
1. В состояние $(t + 1, c, s)$ с вероятностью P_e , что соответствует пустому виртуальному слоту.
 2. В состояние $(t + 1, c, s + 1)$ с вероятностью P_s , что соответствует успешному виртуальному слоту.
 3. В состояние $(t + 1, c + 1, s)$ с вероятностью P_c , что соответствует коллизионному виртуальному слоту.

Перед тем, как определить аналитически вероятности переходов, описанных выше, рассмотрим вероятности обнаружения пустого, успешного и коллизионного виртуальных слотов при условии, что выбранная для процесса А станция не совершает попыток передачи:

$$\begin{aligned} P'_e(t, c, s) &= (1 - Pr(TX|t, c, s))^{N-s-1}, \\ P'_s(t, c, s) &= (N - s - 1)Pr(TX|t, c, s) \cdot (1 - Pr(TX|t, c, s))^{N-s-2}, \\ P'_c(t, c, s) &= 1 - P'_e(t, c, s) - P'_s(t, c, s). \end{aligned}$$

Наконец, можно определить вероятности переходных процессов А и В:

A.

$$\begin{aligned}
P_e^-(t, c, s) &= (1 - Pr(TX|t, r))P_e'(t, c, s), \\
P_s^+(t, c, s) &= Pr(TX|t, r)P_e'(t, c, s), \\
P_s^-(t, c, s) &= (1 - Pr(TX|t, r))P_s'(t, c, s), \\
P_c^+(t, c, s) &= Pr(TX|t, r)(1 - P_e'(t, c, s)), \\
P_c^-(t, c, s) &= (1 - Pr(TX|t, r))P_c'(t, c, s).
\end{aligned}$$

B.

$$\begin{aligned}
P_e(t, c, s) &= (1 - Pr(TX|t, c, s))^{N-s}, \\
P_s(t, c, s) &= (N - s)Pr(TX|t, c, s)(1 - Pr(TX|t, c, s))^{N-s-1}, \\
P_c(t, c, s) &= 1 - P_e - P_s.
\end{aligned}$$

Таким образом, в [1] с помощью всех вероятностей переходов, описанных выше, для каждого момента времени t процессов А и В рекуррентно рассчитываются вероятности $Pr(t, c, s)$, что процесс В находится в состоянии (t, c, s) , и $Pr(t, c, s, r)$, что процесс А находится в состоянии (t, c, s, r) . Однако в работе [1] не было получено распределение числа пакетов, успешно переданных за RAW-слот, что будет сделано далее в данной работе.

Определим для каждого состояния системы (t, c, s) время, затраченное для перехода в это состояние из состояния $(0, 0, 0)$:

$$T(t, c, s) = cT_c + sT_s + (t - c - s)T_e.$$

Заметим, что для каждого состояния (t, c, s) , помимо вероятности нахождения в данном состоянии, мы знаем также число успешных попыток передач внутри RAW-слота, обозначаемое через s . Причем это число никак не может измениться, если до окончания RAW-слота осталось меньше времени, чем необходимо хотя бы для одной успешной попытки передачи пакета, т.е. когда процесс В находится в поглощающем состоянии. Таким образом, если на момент конца RAW-слота система находилась в состоянии с числом успешных попыток передач s , то это же число было и во всех состояниях, момент времени которых превышает величину $T_{slot} - T_s$. Опираясь на это, определим вероятность передать ровно $0 \leq s \leq N$ пакетов во время RAW-слота с длительностью T_{slot} как:

$$P_{T_{slot}}(s|N) = \sum_{T(t,c,s) > T_{slot} - T_s} Pr(t, c, s).$$

Далее опишем поведение системы станций, которым назначен выделенный RAW-слот m , с помощью цепи Маркова с состоянием (n) , где n — число активных станций на момент начала RAW-слота, и единицей времени, равной периоду RAW. Перед этим вспомним, что пакеты генерируются на

станциях с пустой очередью через экспоненциальное время, поэтому вероятность получения пакета станцией через время T , прошедшее с момента последней успешной передачи пакета этой станцией, есть $q = 1 - e^{-\lambda T}$.

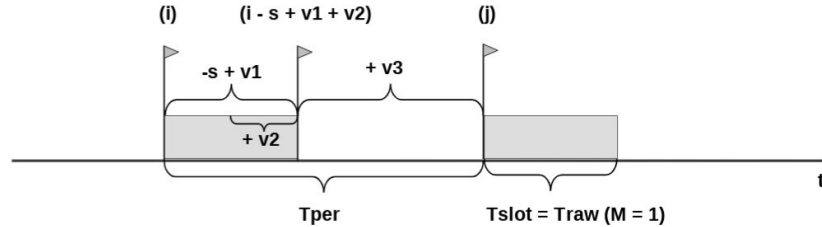


Рис. 1: Изменение числа активных станций на начало RAW-слотов двух соседних периодов.

Обозначим за i и j ($0 \leq i, j \leq N$) число активных станций в начале RAW-слотов двух последовательных периодов. Тогда за один RAW-слот, входящий в текущий период RAW, может случиться s успешных попыток передач с вероятностью $P_{T_{slot}}(s|i)$, а также прийти $v = v_1 + v_2 + v_3$ пакетов до начала следующего RAW-слота, где значения v_1, v_2, v_3 пояснены далее, а также на рис. 1. На неактивных на момент начала RAW-слота станциях в течение RAW-слота может сгенерироваться v_1 пакетов с вероятностью поступления пакета на одну станцию $q_1 = 1 - e^{-\lambda T_{slot}}$. На станциях, которые совершили успешную передачу во время RAW-слота, в течение оставшейся части RAW-слота может сгенерироваться v_2 пакетов с вероятностью $q_2 = 1 - e^{-\lambda T_{slot}/2}$ поступления пакета на станцию (предполагается, что в среднем после выполнения этой успешной передачи остается половина RAW-слота до его окончания). Наконец, станции, очередь которых была пуста на момент конца RAW-слота, в течение времени, оставшегося с момента конца RAW-слота и до конца RAW-периода, могут получить v_3 пакетов с вероятностью $q_3 = 1 - e^{-\lambda(T_{per} - T_{slot})}$ для каждой станции. Заметим, что в формуле ниже v_3 однозначно выражается через предыдущие условия.

Таким образом, получаем матрицу переходных вероятностей из состояния (i) в состояние (j) $P = (p_{ij})$:

$$\begin{aligned}
 p_{i,j} = & \sum_{s=\max(0,i-j)}^i P_{T_{slot}}(s|i) \times \sum_{v_1=0}^{\min(j-(i-s),N-i)} C_{N-i}^{v_1} q_1^{v_1} (1 - q_1)^{N-i-v_1} \times \\
 & \times \sum_{v_2=0}^{\min(j-(i-s+v_1),s)} C_s^{v_2} q_2^{v_2} (1 - q_2)^{s-v_2} \times C_{N-(i-s+v_1+v_2)}^{j-(i-s+v_1+v_2)} \times q_3^{j-(i-s+v_1+v_2)} \times \\
 & \times (1 - q_3)^{(N-(i-s+v_1+v_2))-(j-(i-s+v_1+v_2))}.
 \end{aligned}$$

Далее найдем стационарное распределение \mathbf{x} , где x_n — вероятность обнаружить n активных станций в начале RAW-слота, через собственный вектор

матрицы P , соответствующий собственному значению 1:

$$\mathbf{x}P = \mathbf{x}.$$

Поскольку вероятности по всем возможным n должны суммироваться в единицу, найденный вектор дополнительно нужно отнормировать.

Среднее число пришедших за RAW-период пакетов (которое, поскольку новый пакет поступает на станцию только после доставки предыдущего, также равно среднему числу успешно переданных за один период пакетов):

$$\bar{v} = \sum_{n=0}^N \left[\sum_{s=0}^n s P_{T_{slot}}(s|n) \right] x_n.$$

Тогда пропускная способность системы в RAW-слоте находится как:

$$Th = \frac{\bar{v}}{T_{per}},$$

а средняя задержка пакета как:

$$\bar{D} = \frac{T_{per}N}{\bar{v}} - \frac{1}{\lambda},$$

где в качестве уменьшаемого взято среднее время между двумя успешными попытками передачи для одной станции, найденное с помощью формулы Литтла, а в качестве вычитаемого — среднее время, прошедшее с момента успешной передачи до момента получения нового пакета одной и той же станцией.

Для того чтобы рассчитать среднее количество энергии, потребляемое станцией за один RAW-период, введем следующие обозначения:

- Q_{idle} — количество энергии, которое потребляет активная станция, прослушивающая пустой виртуальный слот,
- Q_{TX} — количество энергии, которое потребляет активная станция, совершающая попытку передачи пакета,
- Q_{busy} — количество энергии, которое потребляет активная станция при прослушивании чужой попытки передачи.

Как было сказано в разделе 3, вне RAW-слота все станции переходят в спящий режим, неактивные станции энергию также не потребляют. Найдем среднее энергопотребление, затрачиваемое всеми станциями на переход из состояния (t, c, s) с общим числом активных станций на момент начала RAW-слота n . Каждая из $n - s$ активных станций передает в текущем виртуальном слоте с вероятностью $Pr = Pr(TX|t, c, s)$, затрачивая при этом энергию Q_{TX} , либо слушает канал с вероятностью $1 - Pr$ в течение пустого (с вероятностью $(1 - Pr)^{n-s-1}$) или занятого виртуального слота, затрачивая соответственно энергию Q_{idle} или Q_{busy} . В результате для совокупности станций получаем:

$$\bar{Q}(t, c, s) = (n - s)[Q_{TX}Pr + (1 - Pr)((1 - Pr)^{n-s-1}Q_{idle} + (1 - (1 - Pr)^{n-s-1})Q_{busy})].$$

Учитывая, что вне RAW-слота станции находятся в спящем режиме, можно считать, что формула выше позволяет рассчитать энергопотребление за целый RAW-период длительностью T_{per} . Тогда среднее энергопотребление за RAW-слот m , который назначен N станциям, рассчитывается по формуле:

$$\overline{Q}_m = \sum_{n=0}^N \overline{Q}^n x_n,$$

и средняя мощность в расчете на одну станцию равна:

$$\overline{P} = \frac{\overline{Q}_m}{NT_{per}}.$$

Помимо мощности, полезной для приложений Интернета вещей метрикой также является среднее энергопотребление, взятое в расчете на один успешно переданный пакет. Найти эту величину можно с помощью формулы:

$$\overline{Q}_s = \frac{\overline{Q}_m}{\overline{v}},$$

из которой видно, что среднее энергопотребление, затрачиваемое на один успешно переданный пакет, неявным образом зависит от длительности RAW-слота T_{slot} и длительности RAW-периода T_{per} , использующихся при расчете среднего числа успешно переданных за RAW-период пакетов \overline{v} .

4.2 Несколько RAW-слотов

Аналогично [3], обобщим модель на случай M RAW-слотов, каждый из которых имеет длительность T_{slot} .

Пропускная способность системы во всем RAW-периоде:

$$Th = \frac{1}{T_{per}} \sum_{m=1}^M \overline{v}_m.$$

Средняя задержка пакета:

$$\overline{D} = \frac{T_{per}N}{\sum_{m=1}^M \overline{v}_m} - \frac{1}{\lambda}.$$

Средняя мощность, потребляемая станцией за один RAW-период:

$$\overline{P} = \frac{1}{T_{per}N} \sum_{m=1}^M \overline{Q}_m.$$

Средняя энергия, затраченная на один успешно переданный пакет за один RAW-период:

$$\overline{Q}_s = \frac{\sum_{m=1}^M \overline{Q}_m}{\sum_{m=1}^M \overline{v}_m}.$$

5 Численные результаты

Оценка точности полученной аналитической модели проводилась при использовании имитационной модели с параметрами, основные из которых были взяты из [2]. Все параметры представлены в табл. 1.

Параметр	Значение
T_s	1064 мкс
T_c	1064 мкс
T_e	52 мкс
Q_{TX}	160 мкДж
Q_{busy}	91 мкДж
Q_{idle}	2,9 мкДж
CTC	0,1
W_0	16
W_{max}	1024

Таблица 1: Параметры моделирования.

В имитационной модели было проведено 10^3 экспериментов, длительность каждого из которых составляла 10^6 RAW-периодов, а число повторных попыток передач пакета предполагалось неограниченным. Оценка точности проводилась для фиксированного потребления канального времени CTC (англ. channel time consumption), рассчитываемого как отношение длительности RAW к его периоду, а значения интенсивности λ (c^{-1}) соответствовали вероятностям получения пакета $q = 1 - e^{-\lambda T_{per}}$, лежащим в диапазоне $[0,05 \dots 0,95]$ с шагом 0,05, где длительность периода находилась по формуле $T_{per} = \frac{T_{raw}}{CTC} = \frac{MT_{slot}}{CTC}$, а в качестве длительностей RAW-слота использовались значения $T_{slot} = 5$ мс и $T_{slot} = 15$ мс.

Рис. 2, 3 показывают результаты оценки средней задержки и средней энергии, затрачиваемой на один успешно переданный пакет, полученные аналитически («ан.») и имитационно («сим.») для $M = 1$. Заметим, что с ростом интенсивности растет количество станций, активных на момент начала RAW-слота, в то время как множество начальных значений счетчика отсрочки пакета на момент начала RAW-слота ограничено минимальным размером конкурентного окна W_0 . Для $N = 5, 10$ количество активных станций всегда оказывается меньше значения W_0 , поэтому средняя задержка растет медленно (рис. 2), в то время как для $N = 20, 40$ станций существуют такие значения интенсивности, при которых среднее число активных на момент начала RAW-слота станций начинает превышать значение W_0 , что гарантирует одновременное достижение нулевого значения счетчика отсрочки сразу несколькими станциями, неизбежно приводящее к коллизии и к увеличению средней задержки. Так, для $N = 20, 40$ станций на рис. 2 можно наблюдать фазу резкого роста кривой средней задержки, в дальнейшем выходящую на плато для $T_{slot} = 5$ мс и сменяющуюся фазой медленного

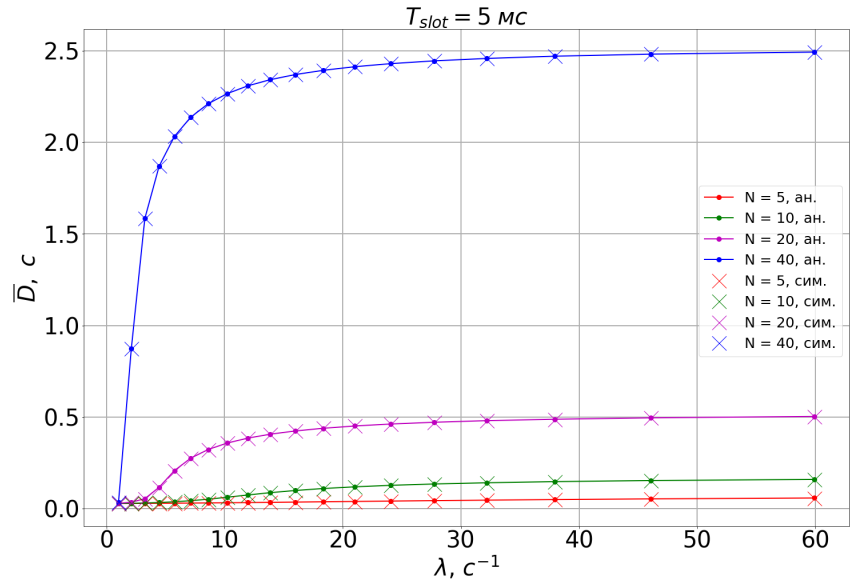
роста для $T_{slot} = 15$ мс, что обусловлено коллизиями в повторных попытках передачи пакета, которые могут происходить в длинном слоте.

С ростом длительности слота растет вероятность совершения повторной попытки передачи пакета в том же RAW-слоте: при коллизии размер конкурентного окна увеличивается вдвое (если не было достигнуто максимальное значение W_{max}), счетчик отсрочки получает новое значение и в достаточно длинных слотах может достичь нулевого значения еще раз, в то время как в коротких слотах на повторную попытку передачи не хватит времени внутри одного RAW-слота, поэтому она может произойти уже в следующем слоте, однако с новым начальным значением счетчика отсрочки (размер конкурентного окна в начале каждого RAW-слота сбрасывается до W_0) и увеличенной задержкой доставки пакета. Поэтому на рис. 2, 3 кривые средней задержки и среднего энергопотребления при условии большого количества конкурирующих станций ($N = 40$) для $T_{slot} = 15$ мс находятся вблизи нулевых значений при низких интенсивностях, а для $T_{slot} = 5$ мс — нет.

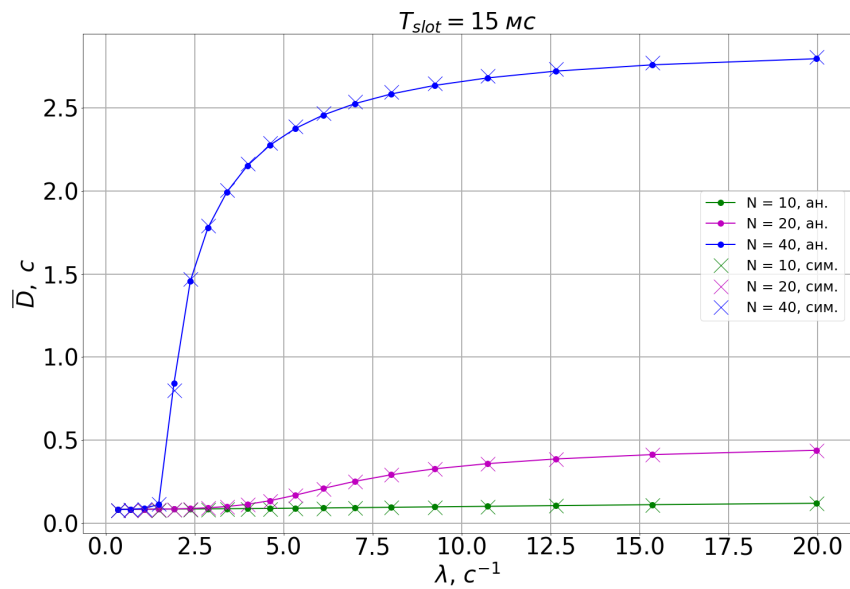
Резкий скачок средней энергии, затрачиваемой на одну успешную попытку передачи пакета (рис. 3), также обусловлен увеличением числа коллизий при увеличении количества активных на момент начала RAW-слота станций: времени на успешную попытку передачи требуется больше, следовательно, увеличивается количество виртуальных слотов, во время которых каждая активная станция потребляет энергию. Аналогично кривым средней задержки пакета, кривые среднего энергопотребления выходят на плато или на фазу медленного роста: количество виртуальных слотов, предшествующих успешной попытке передачи пакета, не меняется или меняется медленно, поэтому энергопотребление ограничено сверху максимальным значением, возможным для RAW-слота заданной длительности с максимальным возможным числом активных на момент начала RAW-слота станций.

Найдем максимальные значения относительных ошибок измерения средней задержки и среднего энергопотребления, затрачиваемого на один успешно переданный пакет, для каждого набора параметров T_{slot} и N аналитической и имитационной моделей (ошибка считалась относительно имитации).

Как видно из табл. 2, погрешность результатов составляет не более 8%, причем максимальные значения погрешностей соответствуют малым интенсивностям генерации пакетов. Подчеркнем, что источником погрешности является упрощенное вычисление вероятности генерации пакета на станции, совершившей успешную попытку передачи (раздел 4.1): время, оставшееся до окончания слота после успешной передачи, предполагается фиксированным и равным половине длительности RAW-слота. Однако с ростом длительности RAW-слота это допущение все больше сказывается на точности аналитической модели (погрешности левых колонок табл. 2 меньше соответственных им правых). При малых интенсивностях успешная передача происходит близко к началу RAW-слота, поэтому чем длиннее слот, тем больше относительная ошибка в определении оставшегося времени до его конца.

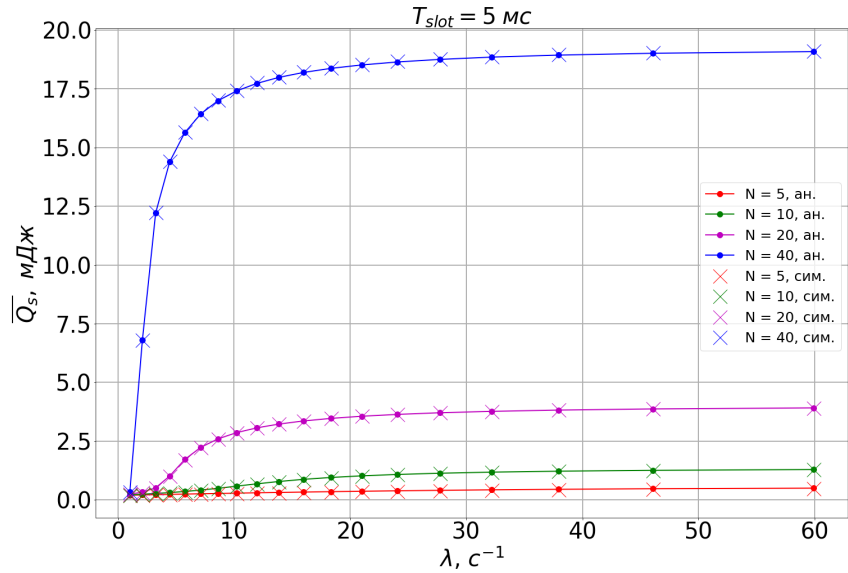


(а)

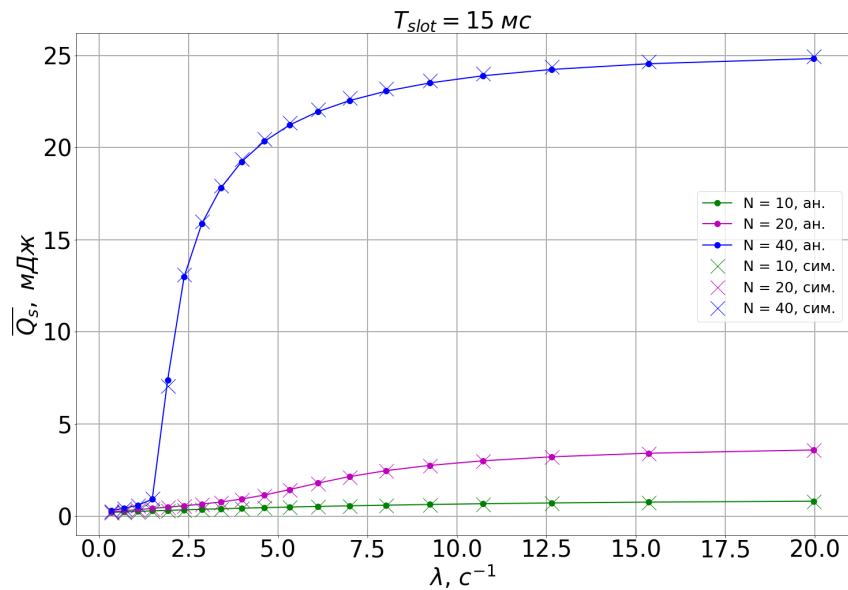


(б)

Рис. 2: Результаты оценки точности нахождения средней задержки пакета для одиночных RAW-слотов с длительностями $T_{slot} = 5 \text{ мс}$ и 15 мс , потребляемой долей канального времени $CTC = 0,1$ и различными значениями λ и N .



(а)



(б)

Рис. 3: Результаты оценки точности нахождения средней энергии, затрачиваемой на один успешно переданный пакет, для одиночных RAW-слотов с длительностями $T_{slot} = 5 \text{ мс}$ и 15 мс , потребляемой долей канального времени $CTC = 0,1$ и различными значениями λ и N .

Средняя задержка		
N	$T_{slot} = 5 \text{ мс}$	$T_{slot} = 15 \text{ мс}$
5	3,4%	—
10	2,8%	7,3%
20	1,8%	6,8%
40	0,6%	5,9%
Среднее энергопотребление		
N	$T_{slot} = 5 \text{ мс}$	$T_{slot} = 15 \text{ мс}$
5	7,0%	—
10	6,4%	6,4%
20	5,5%	5,6%
40	3,8%	4,4%

Таблица 2: Максимальные значения относительных ошибок измерения метрик производительности для каждого значения T_{slot} и N .

6 Заключение

В данной работе исследован механизм PRAW с RAW-слотами произвольной длительности в рамках сценария доставки разреженного трафика. Была разработана аналитическая модель, позволяющая найти среднюю задержку и среднее энергопотребление в расчете на один успешно переданный пакет. Точность аналитической модели была оценена посредством имитационной модели по описанным выше метрикам: ошибка не превышает 8%.

В дальнейшем эту модель планируется использовать для решения задачи минимизации одной из метрик производительности сети при ограничениях на некоторые входные параметры и/или вторую метрику, где в качестве метрик по-прежнему будут рассматриваться средняя задержка и среднее энергопотребление в расчете на один успешно переданный пакет, а в качестве входных параметров можно рассмотреть долю потребляемого канального времени и длину RAW-слота.

Список литературы

1. E. Khorov, A. Krotov, and A. Lyakhov, "Modelling machine type communication in IEEE 802.11 ah networks," in *2015 IEEE international conference on communication workshop (ICCW)*, pp. 1149–1154, IEEE, 2015.
2. E. Khorov, A. Krotov, A. Lyakhov, R. Yusupov, M. Condoluci, M. Dohler, and I. Akyildiz, "Enabling the Internet of Things with Wi-Fi Halow — Performance evaluation of the Restricted Access Window," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127402–127415, 2019.
3. E. Zazhigina, R. Yusupov, E. Khorov, and A. Lyakhov, "Analytical study of Periodic Restricted Access Window Mechanism for Short Slots," *Electronics*, vol. 10, no. 5, p. 549, 2021.

4. A. Bel, T. Adame, and B. Bellalta, "An energy consumption model for IEEE 802.11ah WLANs," *Ad Hoc Networks*, vol. 72, pp. 14–26, 2018.
5. M. Z. Ali, J. Mišić, and V. B. Mišić, "Efficiency of Restricted Access Window scheme of IEEE 802.11 ah under non-ideal channel condition," in *2018 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, pp. 251–256, IEEE, 2018.
6. M. Z. Ali, J. Mišić, and V. B. Mišić, "Performance evaluation of heterogeneous IoT nodes with differentiated qos in IEEE 802.11ah RAW mechanism," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 4, pp. 3905–3918, 2019.
7. G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.
8. V. Vishnevsky and A. Lyakhov, "IEEE 802.11 wireless LAN: Saturation throughput analysis with seizing effect consideration," *Cluster Computing*, vol. 5, no. 2, pp. 133–144, 2002.

Распределение радиоресурсов при использовании методов NOMA и OFDMA в нисходящем канале в сетях Wi-Fi *

С.А. Тутельян, Е.М. Хоров

{tutelian, khorov}@wireless.iitp.ru

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

Аннотация На данный момент требования к беспроводным сетям Wi-Fi постоянно повышаются, однако доступные частотные ресурсы ограничены. Существуют различные методы повышения эффективности использования частотных ресурсов. В данной работе рассмотрено два подобных метода: метод многопользовательских передач с разделением по частоте (англ.: Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) и неортогональный множественный доступ (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA). OFDMA был введен стандартом 802.11ax для использования в сетях Wi-Fi. При помощи OFDMA точка доступа имеет возможность выбирать разные участки частотной полосы для передачи нескольким пользователям. Это позволяет использовать различия в канальных условиях по частоте для повышения общей пропускной способности. Метод NOMA также нацелен на увеличение спектральной эффективности и позволяет осуществлять одновременные передачи на одних и тех же частотах. При этом разделение сигналов обычно происходит по различиям в уровнях мощности.

В данной работе рассматривается задача распределения радиоресурсов в сетях Wi-Fi в нисходящем канале. Предложен алгоритм, решающий данную задачу и использующий OFDMA и NOMA. Показано, что совместное использование указанных методов позволяет добиваться более высокой эффективности работы сети с точки зрения пропускной способности, по сравнению с алгоритмами, использующими только один из этих методов.

1 Введение

На сегодняшний день беспроводные сети Wi-Fi получили широкое распространение. При этом требования к данным сетям постоянно повышаются: растет число одновременных пользователей в сети, повышается объем передаваемого трафика, но при этом сохраняется необходимость быстрой работы в Интернете. Существует ряд методов, призванных удовлетворить растущие

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00846

требования пользователей при ограниченных частотных ресурсах. В данной работе рассматривается задача управления доступными ресурсами при использовании таких методов.

Первым методом является технология мультиплексирования пользователей с ортогональным частотным разделением каналов [1] (англ.: Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA). Данный метод введен стандартом Wi-Fi 802.11ax с целью повысить эффективность использования доступного канала. В работе рассматривается частотно-селективный канал, то есть такой, в котором различные частотные диапазоны имеют разные канальные условия. В таком канале можно, например, каждому из пользователей передавать только на частотах с наименьшим затуханием сигнала от точки доступа до данного пользователя. Несмотря на то, что при разделении канала на более мелкие частотные полосы теряются некоторые поднесущие, такое использование OFDMA позволяет получить более высокую суммарную скорость передачи данных за счет увеличения суммарной принимаемой полезной мощности по сравнению с последовательным использованием однопользовательских передач.

Другим методом, увеличивающим спектральную эффективность при передачах, является неортогональный множественный доступ [2] (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), с помощью которого можно передавать несколько сигналов одновременно в одном и том же частотном диапазоне. В данной работе рассматривается такой вариант NOMA, в котором разделение сигналов пользователей происходит по различию в уровнях мощности. При приеме комбинированного сигнала, отправленного при помощи NOMA, получатель сначала декодирует наиболее сильный сигнал, вычитает его из общего принятого сигнала, затем декодирует следующий по мощности сигнал и так далее, пока не декодирует собственный сигнал. Более подробно механизм передачи с помощью NOMA рассматривается в разделе 2.2.

Совместное использование NOMA и OFDMA в беспроводных сетях уже исследовалось, однако без учета специфики Wi-Fi. Применительно же к сетям Wi-Fi задачи распределения радиоресурсов рассматривались при отдельном применении OFDMA или NOMA. Поэтому в данной работе ставится задача разработать алгоритм планирования ресурсов для нисходящего потока, совместно использующего OFDMA и NOMA, с целью повысить пропускную способность сети по сравнению с алгоритмами, использующими только OFDMA или только NOMA.

Для того, чтобы начать передачу, точка доступа должна определить, каким станциям она будет передавать. Для каждой такой станции точка доступа выбирает частотный диапазон, сигнально-кодую конструкцию (СКК), а также коэффициенты разделения мощностей при использовании NOMA. В работе решается задача выбора станций и определения указанных параметров передачи для них. Для этого предлагается применить жадный подход с использованием NOMA и OFDMA.

Работа организована следующим образом. В разделе 2 представлено описание схемы передач в нисходящем канале с помощью NOMA и OFDMA.

В разделе 3 приведен обзор работ, посвященных решаемой задаче распределения радиоресурсов. В разделе 4 описывается используемая модель сети Wi-Fi. Раздел 5 содержит математическую постановку задачи, а также предлагаемый алгоритм распределения радиоресурсов, использующий NOMA и OFDMA. В разделе 6 представлены результаты имитационного моделирования. Раздел 7 включает работу.

2 Схема передач

2.1 OFDMA

В соответствии со стандартом 802.11ах доступный канал разбивается на частотные диапазоны, называемые ресурсными блоками (англ.: Resource Unit, RU). Ресурсные блоки могут иметь различную, но строго заданную ширину: 26, 52, 106, 242, 484, 996 или 2х996 поднесущих. Любой канал можно разбить на совокупность указанных выше ресурсных блоков. Например, 80 МГц представляется в виде одного ресурсного блока с 996 поднесущими, или двух ресурсных блоков с 484 поднесущими и одного ресурсного блока с 26 поднесущими, или четырех ресурсных блоков с 242 поднесущими и одного ресурсного блока с 26 поднесущими.

Точка доступа может выделить на передачу станции не более одного ресурсного блока. При этом размеры ресурсных блоков внутри одной передачи могут отличаться, то есть каким-то станциям может быть выделена более широкая полоса, а каким-то — более узкая. Это, например, позволяет без уменьшения производительности обслуживать короткие потоки данных, выдавая им малые ресурсные блоки.

2.2 NOMA

В данной работе рассматривается такой вариант NOMA, при котором можно мультиплексировать только два сигнала. Это связано с тем, что при использовании NOMA для мультиплексирования трех и более сигналов сложность аппаратного обеспечения значительно возрастает, в то время как потенциальное увеличение пропускной способности получается сравнительно небольшим [3, 4].

Далее рассмотрим схему передачи и приема мультиплексированного с помощью NOMA сигнала. Пусть точка доступа передает станциям s_1 и s_2 , P — общее количество мощности, выделенное на данную передачу. Для передачи с помощью NOMA вся мощность P делится между двумя сигналами:

$$\begin{aligned}P_{weak} &= xP, \\P_{strong} &= (1 - x)P,\end{aligned}$$

где $x \in [0, 0.5]$ — коэффициент разделения мощности, P_{weak} — мощность слабого сигнала, P_{strong} — мощность сильного сигнала. Станция, которой предназначен сильный сигнал, декодирует свой сигнал, интерпретируя слабый

сигнал как шум. В свою очередь, станция, которой предназначен слабый сигнал, сначала декодирует сильный сигнал, после чего станция вычитает декодированный сигнал из общего принятого сигнала, производя операцию подавления помех (англ.: Successive Interference Cancellation, SIC). Затем эта станция декодирует свой слабый сигнал уже без влияния со стороны сильного сигнала.

Пусть h_1 и h_2 – канальные коэффициенты станций s_1 и s_2 соответственно, и, не ограничивая общности, слабый сигнал предназначен станции s_1 . Тогда при условии идеального выполнения SIC принимаемые сигналы будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} y_{s_1} &= \sqrt{xPh_1} \cdot \psi_1 + \sqrt{(1-x)Ph_1} \cdot \psi_2 + \eta_1 \stackrel{SIC}{=} \sqrt{xPh_1} \cdot \psi_1 + \eta_1, \\ y_{s_2} &= \sqrt{(1-x)Ph_2} \cdot \psi_2 + \sqrt{xPh_2} \cdot \psi_1 + \eta_2, \end{aligned}$$

где ψ_1, ψ_2 передаваемые символы станциям s_1 и s_2 соответственно, η_1, η_2 – аддитивный белый гауссов шум с дисперсией σ^2 . Успешность декодирования сигналов зависит от значений отношения сигнал/шум, которые описываются в разделе 4.2.

2.3 Сбор подтверждений

Сбор подтверждений (англ. Acknowledgement, ACK) от станций после многопользовательской передачи может осуществляться разными способами. Во-первых, точка доступа может последовательно опросить все станции, участвовавшие в передаче. Таким образом, каждое добавление пользователя в передачу влечет за собой также отправку двух дополнительных служебных кадров: запроса подтверждения и ответа.

В стандарте 802.11ax появился способ сбора подтверждений при использовании OFDMA в восходящем канале, который позволяет снизить накладные расходы. После выполнения передачи данных точка доступа отправляет специальный триггер-кадр, содержащий информацию для каждого пользователя, участвовавшего в передаче. В нем точка доступа передает информацию о назначении ресурсных блоков пользователям для отправки подтверждений. Таким образом, через короткий межкадровый интервал (англ.: Short Interframe Space, SIFS) после запроса с точки доступа все станции отвечают кадрами подтверждения одновременно. В разделе 4.1 указан используемый в данной работе вариант разделения кадров подтверждения по ресурсным блокам. Общая схема передачи представлена на рис. 1.

3 Обзор литературы

В литературе задача распределения радиоресурсов решается в основном применительно к сотовым сетям из-за их централизованной структуры, а также большого количества параметров, которыми можно управлять для

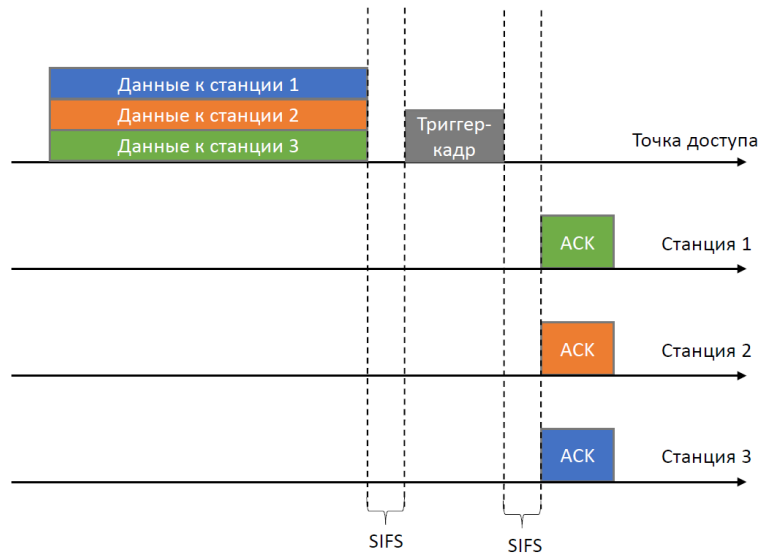


Рис. 1: Схема многопользовательской передачи

повышения производительности сети. В частности, существует ряд работ, посвященных проблеме выделения ресурсов при использовании методов NOMA и OFDMA. В работе [5] авторы предложили методы разбиения пользователей по группам при использовании NOMA, а также алгоритм распределения мощности внутри группы. Показано, что использование NOMA увеличивает суммарную пропускную способность как в нисходящем, так и в восходящем канале. Однако в работе не уделено внимания проблеме распределения указанных групп по поднесущим.

В работе [6] исследовались передачи в восходящем канале при условии, что каждому пользователю выделяется непрерывная частотная полоса. Показано, что потенциально NOMA может давать большой прирост в производительности сети.

Также существуют работы, посвященные выбору пользователей и распределению ресурсов между ними, учитывающие специфику сетей Wi-Fi стандарта 802.11ax. В работе [7] предложен алгоритм выделения ресурсных блоков и назначения СКК пользователям при выполнении передач в восходящем канале. Показано, что OFDMA позволяет увеличить пропускную способность с увеличением нагрузки на сеть.

Работа [8] посвящена распределению радиоресурсов в восходящем потоке в условиях межсетевой интерференции и частотно-селективных замираний. Предложен алгоритм, учитывающий неоднородности по частоте, кото-

рый получает значительное преимущество над алгоритмом, использующим только однопользовательские передачи.

В работе [9] авторы при распределении ресурсных блоков решают задачу оптимизации функции определенного вида, например, минимизация наибольшей длительности передачи. Однако скорость передач зависит только от ширины выделяемых ресурсных блоков, что означает, что не учитывается возможная частотная селективность канала.

В работе [10] предлагается рекурсивный метод для распределения ресурсных блоков между пользователями. Сначала выбирается пользователь на передачу для ресурсного блока, занимающего весь канал, а затем такая же задача выбора решается для ресурсных блоков меньшего размера, из которых состоит больший ресурсный блок. После этого указанная операция проводится для ресурсных блоков меньшего размера и так далее. Показано, что данный алгоритм превосходит некоторые другие стратегии распределения пользователей. В разделе 6 будет проведено сравнение с этим алгоритмом.

4 Модель системы

4.1 Сценарий

В работе рассматривается модель сети Wi-Fi стандарта 802.11ax с одной точкой доступа. Вокруг точки доступа равномерно распределены станции в круге радиуса D . Точка доступа может передавать либо насыщенный трафик, либо Web-трафик. Передача насыщенного трафика подразумевает, что точка доступа всегда имеет данные на передачу для всех станций, ассоциированных с ней. Если же точка доступа передает Web-трафик, то это означает, что для каждой из станций в случайные моменты времени, выбранные из экспоненциального распределения, на точку доступа приходят потоки данных конечной длины.

Точка доступа может использовать методы OFDMA и NOMA при выполнении передач. Стоит отметить, что стандарт 802.11ax не предполагает использования NOMA. Однако данный метод может быть использован в сетях Wi-Fi при помощи, например, изменения передачи стандартной преамбулы физического уровня [2], сигнализируя таким образом получателям о том, что в передаче используется NOMA. В данной работе предполагается, что станции способны при помощи заголовка физического уровня 802.11ax производить SIC без ошибок и, как следствие, принимать кадры, переданные с помощью NOMA.

Для получения подтверждений была выбрана схема с передачей триггер-кадров. Весь доступный канал делится на такое количество ресурсных блоков одинаковой ширины, чтобы каждой станции, участвовавшей в передаче данных, достался свободный. Точка доступа назначает все станции в выбранные ресурсные блоки и передает триггер-кадр с этой информацией. Затем станции передают подтверждения в указанных ресурсных блоках.

4.2 Вычисление отношений сигнал/шум

В работе рассматривается частотно-селективный канал. Пусть точка доступа выбрала для передачи с мощностью P некоторой станции ресурсный блок r , состоящий из n поднесущих. Тогда отношение сигнал/шум (англ.: Signal-to-Noise Ratio, SNR) при приеме на i -ой поднесущей будет следующим:

$$SNR_i = \frac{\frac{P}{n}|h_i|^2}{\sigma_{sub}^2},$$

где σ_{sub}^2 – мощность теплового шума на одной поднесущей, h_i – канальный коэффициент на i -ой поднесущей. Чтобы получить одно значение SNR на выбранном ресурсном блоке используется метод получения эффективного SNR по оценкам канальной емкости [11]:

$$SNR_{eff} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (1 + SNR_i)} - 1. \quad (1)$$

Пусть теперь в указанном ресурсном блоке происходит передача станциями s_1 и s_2 при помощи NOMA с коэффициентом разделения мощности x , причем слабый сигнал предназначен станции s_1 , а сильный – станции s_2 . Тогда отношения сигнал/шум на i -ой поднесущей будут следующими:

$$SNR_i^{weak}(s_1) = \frac{\frac{xP}{n}|h_i^1|^2}{\sigma_{sub}^2} = xa_i,$$

$$SNR_i^{strong}(s_2) = \frac{\frac{(1-x)P}{n}|h_i^2|^2}{\frac{xP}{n}|h_i^2|^2 + \sigma_{sub}^2} = \frac{(1-x)b_i}{b_i x + 1},$$

где $a_i = \frac{P|h_i^1|^2}{n\sigma_{sub}^2}$, $b_i = \frac{P|h_i^2|^2}{n\sigma_{sub}^2}$. Значения эффективного SNR получаются по формуле (1):

$$SNR^{weak}(s_1) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (1 + xa_i)} - 1,$$

$$SNR^{strong}(s_2) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \frac{1 + b_i}{1 + b_i x}} - 1.$$

При приеме кадра используется модель ошибок NIST [12], которая по заданному значению эффективного SNR, длине передаваемого пакета и используемой СКК возвращает вероятность успешного приема.

5 Распределение радиоресурсов

5.1 Постановка задачи

Пусть S – множество станций, для которых у точки доступа есть данные. Требуется выбрать набор станций на передачу, а также выделить им ре-

сурсные блоки и СКК. Пусть L – множество всех СКК, R^{all} – множество всех ресурсных блоков для заданного канала. Задана метрика $\lambda(s, r, l, x)$, характеризующая качество решения при выделении станции $s \in S$ ресурсного блока $r \in R^{all}$ и СКК $l \in L$. Коэффициент $x \in [0, 1]$ является долей мощности, выделенной на сигнал. Для станций, при передаче которым не используется NOMA, данный коэффициент равен 1.

В данной работе считается, что каналные условия станций известны на точке доступа. Поэтому точка доступа может вычислить вероятности приема пакетов при заданных СКК, ресурсных блоках и мощностях передачи. Если вероятность ошибки приема на какой-то станции s оказывается больше заданного порога, то точка доступа считает, что такая передача не будет успешной, и $\lambda(s, r, l, x) = 0$.

Пусть G – набор назначений (s, r, l, x) . Тогда общее качество распределения ресурсов характеризуется функцией полезности $F(G)$:

$$F(G) = \sum_{(s,r,l,x) \in G} \lambda(s, r, l, x). \quad (2)$$

При этом задачу выбора распределения радиоресурсов можно записать в следующем виде:

$$\max_{G \in \mathfrak{G}} F(G) = \max_{G \in \mathfrak{G}} \sum_{(s,r,l,x) \in G} \lambda(s, r, l, x), \quad (3)$$

где \mathfrak{G} – множество распределений, подчиняющихся следующим требованиям:

$$\begin{aligned} \forall (s_1, r_1, l_1, x_1), (s_2, r_2, l_2, x_2) \in G &\implies s_1 \neq s_2, \\ \forall (s_1, r_1, l_1, x_1), (s_2, r_2, l_2, x_2) \in G, r_1 = r_2 &\implies x_1 + x_2 = 1, \\ \forall (s_1, r_1, l_1, x_1), (s_2, r_2, l_2, x_2) \in G, r_1 \neq r_2 &\implies r_1 \cap r_2 = \emptyset. \end{aligned}$$

В данной работе в качестве метрики качества решения λ была выбрана метрика Proportional Fair (PF):

$$\lambda(s, r, l, x) = \frac{C(s, r, l, x)}{Q(s)},$$

где $C(s, r, l, x)$ – скорость передачи данных на СКК l в ресурсном блоке r , $Q(s)$ – средняя скорость передачи на станцию s . $C(s, r, l, x) = 0$, если получающаяся вероятность ошибочного приема пакета выше порогового значения. Метод PF стремится добиться высокой пропускной способности, пытаясь обслужить при этом всех пользователей.

5.2 Предлагаемый алгоритм

Пусть задано разбиение канала R на ресурсные блоки, $r_i, r_j \in R \implies r_i \cap r_j = \emptyset$. В зависимости от текущих назначений ресурсные блоки можно разделить на три подмножества:

- R^{free} – свободные ресурсные блоки, в которые не назначены станции.
- R^{single} – ресурсные блоки, в которые назначена одна станция, можно добавить еще одну станцию для передачи с помощью NOMA.
- R^{noma} – ресурсные блоки, в которые назначены две станции.

Пусть задана некоторая совокупность таких разбиений $Y = \{R_i\}_{i=1}^k$. Для решения задачи (3) предлагается использовать следующий жадный алгоритм.

В начале все ресурсные блоки $r \in R^{free}$. Пусть S^{free} – множество станций, которым не были назначены ресурсные блоки. Алгоритм выполняется пошагово, на каждом шаге выбирается станция $s \in S^{free}$, ресурсный блок $r \in R^{free} \cup R^{single}$ и СКК l так, чтобы прирост функции полезности F был наибольшим:

$$\begin{aligned} & \arg \max_{(s,r,l,x)} (F(G^*) - F(G)) \\ & (s, r, l, x) : \{s \in S^{free}, r \in \{R^{free} \cup R^{single}\}, l \in L\}, \\ & G^* = \begin{cases} G \cup (s, r, l, 1), r \in R^{free}, \\ \{G \setminus (s_0, r, l_0, 1)\} \cup \{(s_0, r, l_1, x) \cup (s, r, l_2, 1 - x)\}, r \in R^{single}. \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

Второе выражение в (4) соответствует передаче станции s с помощью NOMA. В этом случае СКК l_0 для ранее выбранной станции s_0 , может поменяться на другое значения из-за уменьшения мощности передачи данной станции. Коэффициент разделения мощности x для заданной пары СКК выбирается так, как описано в [13]. Если станция была выбрана, то она исключается из S^{free} , а соответствующий ресурсный блок r переходит из R^{free} в R^{single} или из R^{single} в R^{noma} .

Если на каком-то шаге не удалось выбрать станцию для назначения, то построение распределения завершается. Данный алгоритм работает для всех разбиений из Y , после чего выбирается наилучшее распределение, согласно значениям функции F (2).

В данной работе в качестве множества Y берутся разбиения канала на равные ресурсные блоки, ширина которых не меньше 20 МГц. В этом случае, например, канал 80 МГц разбивается на один 80 МГц ресурсный блок, два 40 МГц ресурсных блока или четыре 20 МГц ресурсных блока. Ограничение в 20 МГц выбрано для уменьшения сложности алгоритма, а также из-за возможного увеличения накладных расходов при использовании ресурсных блоков малого размера.

6 Численные результаты

Для оценки эффективности предложенного алгоритма была построена имитационная модель сети 802.11ax на базе платформы имитационного моделирования ns-3 [14] с возможностями передачи с помощью OFDMA и NOMA. В качестве модели канала используется Model-D NLOS [15, 16]. Точка доступа работает в канале 80 МГц в диапазоне 5 ГГц. Максимальная мощность

передачи $P = 16$ дБм. Мощность теплового шума в 20 МГц = -94 дБм. Для модели ошибок NIST [12] выбран порог вероятности ошибочного приема пакета = 0.1, при превышении которого алгоритм полагает $\lambda = 0$.

Было проведено сравнение следующих алгоритмов распределения ресурсов:

1. «OFDMA + NOMA» – предложенный алгоритм, разбивающий канал на равные ресурсные блоки с возможностью передачи с помощью NOMA.
2. «SU» – используются передачи только на одного пользователя во всем канале (англ.: Single User, SU).
3. «NOMA» – передачи с помощью NOMA во всем канале.
4. «OFDMA» – рекурсивный алгоритм из работы [10], использующий OFDMA.

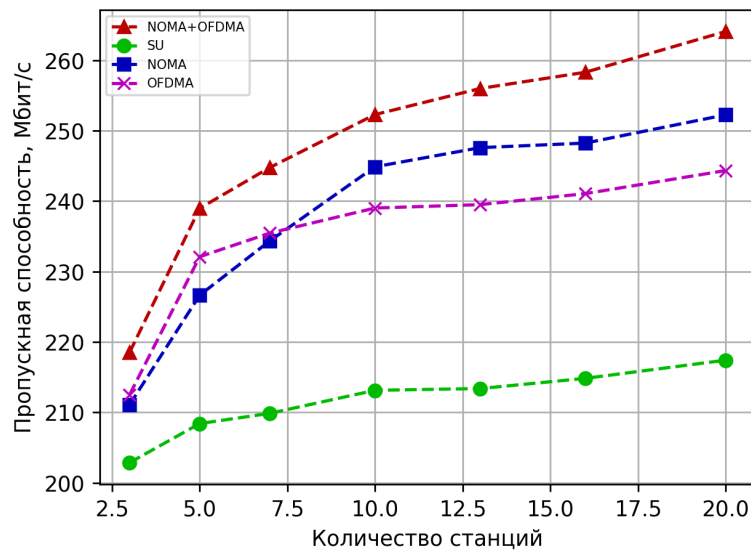


Рис. 2: Насыщенный трафик, пропускная способность

В серии экспериментов рассмотрена одна точка доступа, вокруг которой равномерно распределены станции в круге радиуса $D = 20$ метров. На рис. 2 показаны значения пропускной способности в случае, если точка доступа передает насыщенный трафик. Результаты показывают преимущество предложенного алгоритма над алгоритмами, использующими только OFDMA или только NOMA. Стоит отметить, что при увеличении числа пользователей большую роль начинает играть NOMA. Это связано с тем,

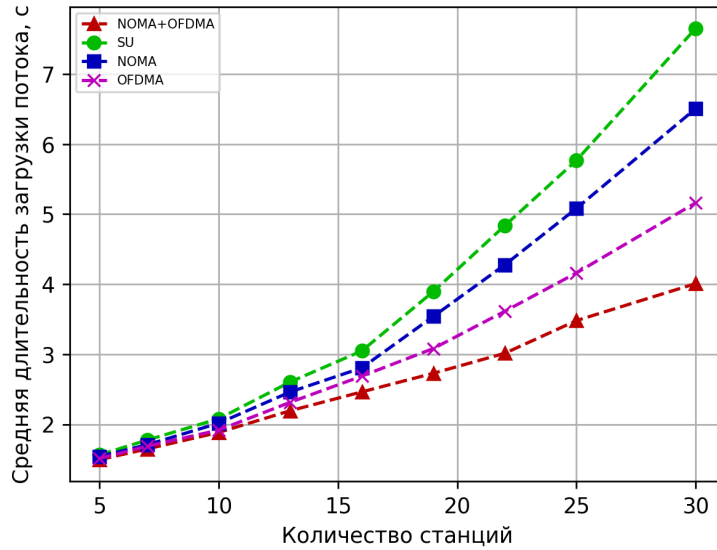


Рис. 3: Web-трафик, задержка

что пар с большой разницей в канальных условиях становится больше, а использование NOMA позволяет получать преимущество от передач таким парам.

Также рассмотрена передача Web-трафика. Размеры Web-потоков задаются усеченным логнормальным распределением с минимальным, средним и максимальным значениями 100 КБ, 10 МБ и 50 МБ соответственно. Время прихода нового потока распределено экспоненциально с минимальным, средним и максимальным значениями 10 с, 15 с и 20 с соответственно. На рис. 3 и 4 представлены средние задержки передачи каждого потока, а также значения пропускной способности. Видно, что в этом случае предложенный алгоритм также получает преимущество по указанным метрикам при увеличении количества пользователей в системе.

Стоит отметить, что с ростом числа пользователей в случае передачи Web-трафика, алгоритм, использующий только NOMA, работает несколько хуже, чем алгоритмы, использующие OFDMA. Это происходит потому, что станции с плохими канальными условиями дольше остаются в системе, в результате чего возникают ситуации, когда их становится сравнительно много, а станций с хорошими условиями почти нет. При использовании метрики PF это может приводить к тому, что у многих пользователей с плохими условиями в канале будет высокий приоритет, а применение NOMA для обслуживания таких пользователей является неэффективным. В это же время

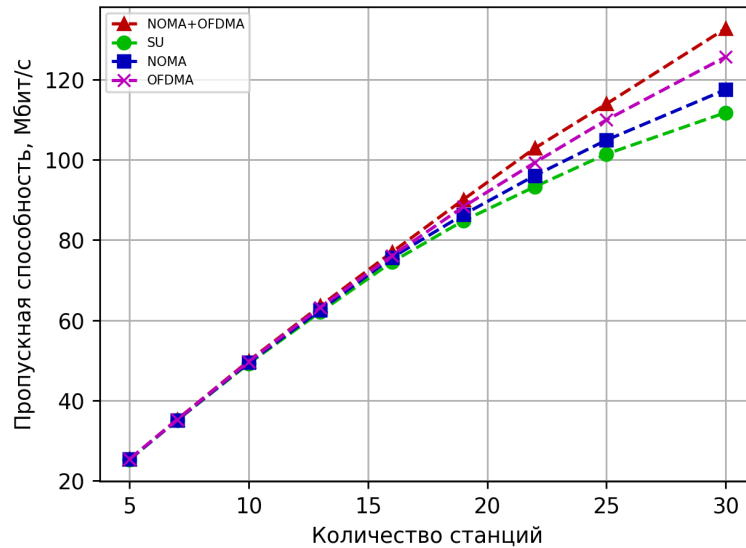


Рис. 4: Web-трафик, пропускная способность

предложенный алгоритм может использовать преимущества OFDMA в таких ситуациях.

7 Заключение

В данной работе рассмотрена задача управления радиоресурсами в нисходящем канале в сетях Wi-Fi. Предложен алгоритм распределения радиоресурсов, использующий методы OFDMA и NOMA. По результатам имитационного моделирования можно сделать вывод, что совместное использование OFDMA и NOMA позволяет увеличить пропускную способность и снизить задержки в сетях Wi-Fi по сравнению с использованием только одного из данных методов.

Список литературы

1. A tutorial on IEEE 802.11 ax high efficiency WLANs / Khorov Evgeny, Kiryanov Anton, Lyakhov Andrey, and Bianchi Giuseppe // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2018. — Vol. 21, no. 1. — P. 197–216.
2. Prototyping and experimental study of non-orthogonal multiple access in Wi-Fi networks / Khorov Evgeny, Kureev Aleksey, Levitsky Ilya, and Akyildiz Ian F // IEEE Network. — 2020. — Vol. 34, no. 4. — P. 210–217.

3. On multiple users scheduling using superposition coding over Rayleigh fading channels / Zafar Ammar, Shaqfeh Mohammad, Alouini Mohamed-Slim, and Alnuweiri Hussein // *IEEE Communications Letters*. — 2013. — Vol. 17, no. 4. — P. 733–736.
4. Otao Nagisa, Kishiyama Yoshihisa, Higuchi Kenichi. Performance of non-orthogonal multiple access with SIC in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation // *IEICE transactions on communications*. — 2015. — Vol. 98, no. 2. — P. 344–351.
5. Ali Md Shipon, Tabassum Hina, Hossain Ekram. Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems // *IEEE access*. — 2016. — Vol. 4. — P. 6325–6343.
6. Uplink non-orthogonal multiple access (NOMA) with single-carrier frequency division multiple access (SC-FDMA) for 5G systems / Li Anxin, Benjebbour Anass, Chen Xiaohang, Jiang Huiling, and Kayama Hidetoshi // *IEICE Transactions on Communications*. — 2015. — Vol. 98, no. 8. — P. 1426–1435.
7. OFDMA uplink scheduling in IEEE 802.11 ax networks / Bankov Dmitry, Didenko Andre, Khorov Evgeny, and Lyakhov Andrey // *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)* / IEEE. — 2018. — P. 1–6.
8. IEEE 802.11 ax OFDMA Resource Allocation with Frequency-Selective Fading / Tutelian Sergei, Bankov Dmitry, Shmelkin Dmitri, and Khorov Evgeny // *Sensors*. — 2021. — Vol. 21, no. 18. — P. 6099.
9. MMRU-ALLOC: An optimal resource allocation framework for OFDMA in IEEE 802.11 ax / Dutta Avik, Gupta Naman, Das Syamantak, and Maity Mukulika // *2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* / IEEE. — 2020. — P. 1–6.
10. Wang Kaidong, Psounis Konstantinos. Efficient scheduling and resource allocation in 802.11 ax multi-user transmissions // *Computer Communications*. — 2020. — Vol. 152. — P. 171–186.
11. Hanzaz Zakaria, Schotten Hans Dieter. Analysis of effective SINR mapping models for MIMO OFDM in LTE system // *2013 9th international wireless communications and mobile computing conference (IWCMC)* / IEEE. — 2013. — P. 1509–1515.
12. Pei Guangyu, Henderson Thomas R. Validation of OFDM model in ns-3. — 2011.
13. Tutelian SA, Khorov EM. Nonorthogonal Multiple Access for Servicing the Internet of Things and Web Traffic in Wi-Fi Networks // *Journal of Communications Technology and Electronics*. — 2020. — Vol. 65, no. 6. — P. 741–749.
14. Network simulator 3 (NS-3). — Access mode: <https://www.nsnam.org/>.
15. TGax channel model. — 2014. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0882-04-00ax-tgax-channel-model-document.docx> (online; accessed: 7 June 2021).
16. TGac channel model addendum. — 2009. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/09/11-09-0308-03-00ac-tgac-channel-model-addendum-document.doc> (online; accessed: 7 June 2021).

Об эффективности стратегий группировки пользователей для обслуживания URLLC-трафика в восходящем канале*

Шамсутдинов А.М.², Шашин А.Э.¹, Красилов А.Н.¹

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

shamsutdinov@wireless.iitp.ru {ashashin, akrasilov}@hse.ru

Аннотация Для обеспечения сверхнизкой задержки при передаче данных в восходящем канале спецификации сетей 5G предлагают метод доступа к каналу без запроса полосы (англ: Grant-Free). При использовании данного метода базовая станция заранее конфигурирует для каждого пользователя параметры передачи и выделяет частотно-временные ресурсы. При обслуживании аperiodического трафика выделение каждому пользователю отдельных канальных ресурсов является неэффективным, так как пользователи могут не иметь данных на передачу в зарезервированные моменты времени. Однако использование всеми пользователями общих канальных ресурсов также может быть неэффективным из-за интерференции между передачами разных пользователей. Одним из методов снижения интерференции является разделение пользователей на группы и выделение каждой группе частотного подканала. В данной работе исследованы различные стратегии группировки пользователей и выделения канальных ресурсов для сценариев с гомогенным и гетерогенным трафиком. Выявлены стратегии, которые позволяют повысить емкость сети по сравнению со случаем использования всеми пользователями общих канальных ресурсов.

Keywords: 5G, URLLC, Grant-Free, группировка пользователей, восходящий канал

1 Введение

Одной из основных особенностей сотовых сетей пятого поколения (5G) является появление новых сервисов, которые предъявляют значительно более строгие требования к качеству обслуживания, чем сервисы предыдущих поколений. Одним из таких сервисов является сверхнадежная связь с низкой

* Исследование выполнено в НИУ ВШЭ за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10158, <https://rscf.ru/project/21-79-10158/>

задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC), которая необходима для поддержки множества современных и будущих приложений, требующих доставки данных за время порядка 1 мс с вероятностью, близкой к единице [1]

В спецификациях сетей 5G [2, 3] вводятся два метода доступа к восходящему каналу: с запросом разрешения на передачу (англ.: Grant-Based) и без такого запроса (англ.: Grant-Free). Согласно Grant-Based методу для передачи данных пользователю необходимо отправить запрос на передачу. После получения такого запроса базовая станция выбирает частотно-временные ресурсы и параметры для осуществления пользователем запрашиваемой передачи. Только после получения ответа от базовой станции пользователь может начать передачу данных. Процедура получения разрешения на передачу значительно увеличивает задержку в восходящем канале, поэтому данный метод обычно не рассматривается для обслуживания URLLC-трафика, обладающего строгими требованиями к допустимой задержке. Согласно методу Grant-Free базовая станция заранее выбирает ресурсы и параметры передачи, такие как Сигнально-Кодовая Конструкция (СКК) и количество попыток передачи, после чего сообщает пользователю информацию о них. Когда пользователь осуществляет передачу данных, он использует сконфигурированные базовой станцией параметры и ресурсы, что позволяет значительно сократить задержку по сравнению с методом Grant-Based. При этом пользователь может не дожидаться подтверждения успешности доставки данных от базовой станции, а выполнить несколько безусловных попыток передачи одного пакета, что позволяет снизить задержку на осуществление повторных попыток передачи [4, 5].

При назначении пользователям частотно-временных ресурсов базовой станции необходимо учитывать особенности трафика, генерируемого пользователями. Так, например, в случае периодического трафика каждому пользователю можно заранее выделить необходимые ресурсы, что позволит избежать интерференции между передачами разных пользователей. Однако в случае, когда пользователи генерируют аperiodический трафик, такой подход является неэффективным, так как у пользователей может не оказаться пакетов на передачу в зарезервированные моменты времени. Поэтому в случае аperiodического трафика во многих работах [6–8] рекомендуется использовать общие частотно-временные ресурсы для передачи данных. Помимо особенностей периодичности трафика, разные пользователи могут обладать разными требованиями к качеству обслуживания, что также необходимо учитывать при назначении канальных ресурсов.

При использовании общих частотно-временных ресурсов между передачами разных пользователей может возникать интерференция. Для повышения вероятности успешного декодирования пакетов в условиях интерференции базовая станция может использовать механизм последовательного подавления помех (англ.: Successive Interference Cancellation, SIC). Согласно этому механизму при одновременном приеме сигналов от нескольких пользователей базовая станция сначала декодирует более мощный сигнал, и, в

случае успешного декодирования, он вычитается из суммарного, снижая при этом мощность интерференции для остальных сигналов [9]. Однако механизм SIC не позволяет полностью устранить влияние интерференции на вероятность успешной передачи пакета.

Еще одним способом снизить влияние интерференции является разделение пользователей на группы и выделение каждой группе отдельного частотного подканала. Целью данной работы является исследование эффективности различных стратегий группировки пользователей и выделения частотного подканала каждой группе по сравнению со случаем использования всеми пользователями общих канальных ресурсов. В качестве показателя эффективности работы сети в данной работе используется емкость сети, определенная в спецификации [10] как максимальная нагрузка (объем трафика, генерируемого всеми пользователями), при которой требования URLLC-приложений к качеству обслуживания выполнены по крайней мере для 99% пользователей.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 представлено современное состояние исследований по теме использования метода Grant-Free и группировки пользователей в восходящем канале. В разделе 3 приводится описание исследуемых стратегий группировки пользователей и выделения частотных подканалов. В разделе 4 представлены численные результаты исследования эффективности стратегий группировки. В разделе 5 резюмируются основные результаты работы.

2 Обзор литературы

Существующие работы, посвященные исследованию метода Grant-Free в восходящем канале, в основном исследуют выбор параметров передачи. В работах [4, 6, 11] разработаны аналитические модели, позволяющие оценить вероятности потери пакета при заданной конфигурации параметров. В работах [12, 13] метод Grant-Free и выбор параметров передачи исследуется с помощью имитационного моделирования. Авторы работ [14, 15] предлагают адаптивные алгоритмы, позволяющие выбирать для пользователей СКК или количество попыток передачи. В работах [9, 16] разработан адаптивный алгоритм совместного выбора СКК и количества попыток передачи в зависимости от канальных условий пользователей. Этот алгоритм используется в данной работе для выбора параметров передачи пользователями. Однако перечисленные выше работы не исследуют группировку пользователей и выделение каждой группе частотного подканала.

Группировка пользователей и выделение каждой группе части канала хорошо изучена в литературе в случае, когда пользователи получают доступ к восходящему каналу с помощью метода Grant-Based [17–19]. В этом случае базовая станция может контролировать какие пользователи, в какой момент времени и в каких частотных ресурсах могут передавать данные. Однако в случае использования метода Grant-Free пользователи получают доступ к каналу случайным образом, и базовая станция не может контролировать

в какие моменты времени пользователи будут передавать данные. Поэтому результаты описанных исследований не могут быть напрямую применимы к случаю, когда пользователи используют метод Grant-Free.

Таким образом, анализ существующих работ показывает, что в литературе отсутствуют исследования методов группировки пользователей и выделения каждой группе частотного подканала, в случае, когда пользователи используют метод Grant-Free. В данной работе исследуется эффективность различных стратегий группировки и выделения каждой группе частотного подканала.

3 Стратегии группировки пользователей

Механизм SIC, используемый базовой станцией для декодирования сигналов, не всегда позволяет полностью исключить интерференцию и успешно декодировать передачи всех пользователей. Ошибки при декодировании могут возникать из-за различных причин.

С одной стороны, разные пользователи имеют разный уровень затухания сигнала (англ.: PathLoss, PL). Вероятность успешного декодирования сигналов пользователей с более высоким уровнем затухания ниже, чем пользователей с более низким уровнем затухания, поскольку сигналы с меньшей мощностью декодируются в последнюю очередь, а значит сильнее подвержены ошибкам.

С другой стороны, одновременное декодирование сигналов пользователей, имеющих близкий уровень затухания сигнала, также может быть подвержено ошибками, из-за низкого отношения сигнал/шум+интерференция при декодировании. Поэтому в данной работе исследуются две противоположные стратегии группировки: объединение пользователей с близким уровнем затухания и группировка, направленная на увеличение разности уровней затухания соседних пользователей.

Кроме того, в работе также исследуется стратегия группировки пользователей по типу требований к качеству обслуживания, которая может быть использована в сценариях с гетерогенным трафиком (т.е. сценариях, в которых разные пользователи имеют разные требования к качеству обслуживания). Далее подробно описаны рассматриваемые стратегии группировки.

3.1 Группировка объединением по PL

Идея данного метода состоит в том, чтобы разделить пользователей по значению затухания сигнала, «защитив» тем самым пользователей с низкой мощностью сигнала на базовой станции от интерференции со стороны пользователей с высокой мощностью сигнала. Для этого базовая станция измеряет величину затухания сигнала каждого пользователя с помощью пилотных сигналов SRS (англ.: Sounding Reference Signals). Деление пользователей происходит по пороговому значению затухания сигнала (англ.: Path Loss, PL). Пользователи с PL меньше порогового помещаются в группу, которую

будем называть «ближняя», а пользователи с PL больше порогового – в группу, которую будем называть «дальняя». В работе исследование данной стратегии ограничивается случаем разбиения на две группы, однако число групп может быть увеличено за счет выделения дополнительных пороговых значений PL .

При разбиении канала необходимо учитывать количество пользователей в каждой группе и выделять подканалы в пропорции, близкой к пропорции числа пользователей в соответствующих группах. При этом, поскольку пользователи в «дальней» группе обладают худшими канальными условиями, чем в ближней, для обеспечения одинакового качества обслуживания обеих групп пользователей доля выделяемого канала для «дальней» группы должна быть больше, чем доля пользователей «дальней» группы в сети. В работе исследуется влияние разбиения канала по ширине между «ближней» и «дальней» группой на суммарную емкость сети.

3.2 Группировка прореживанием

Идея данного метода заключается в том, чтобы увеличить разность уровней затухания между сигналами соседних пользователей. Для этого, аналогично предыдущему методу, базовая станция измеряет величину затухания сигнала каждого пользователя с помощью пилотных сигналов SRS. После этого пользователи нумеруются по возрастанию уровня затухания сигнала: $\gamma_1 \leq \gamma_2 \leq \dots \gamma_N$, где γ_i – PL i -ого пользователя. Пользователи разделяются на k групп следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Группа 1} &= \{1, k + 1, 2k + 1, \dots\}, \\ \text{Группа 2} &= \{2, k + 2, 2k + 2, \dots\}, \\ &\dots \\ \text{Группа } k &= \{k, 2k, 3k, \dots\}. \end{aligned}$$

Поскольку при такой группировке количество пользователей в каждой группе примерно одинаково и каждая группа содержит как пользователей с низким PL , так и с высоким, каждой группе следует выделить одинаковый частотный подканал с шириной $\frac{BW}{k}$, где BW – ширина канала доступного канала.

3.3 Группировка по требованиям к качеству обслуживания

В сценарии, когда разные пользователи имеют разные ограничения на задержку, пользователи с более строгими требованиями являются более уязвимыми к коллизиям, поскольку они могут совершить меньшее число попыток передачи. Поэтому в таком сценарии предлагается объединять пользователей с одинаковыми требованиями к качеству обслуживания в одну группу. Таким образом, пользователи с более строгими ограничениями на задержку испытывают меньшее влияние коллизий, так как интенсивность потока пакетов с учетом повторных попыток внутри такой группы значительно меньше, чем в случае использования всеми пользователями общих канальных ресурсов.

Таблица 1. Параметры моделирования

Параметр	Значение
Несущая частота	2 ГГц
Расстояние между поднесущими	30 кГц
Ширина канала	100 МГц, 16 ГРБ
Длительность мини-слота	142,8 мкс
Размер пакета	32 байта
Интенсивность генерации пакетов	150 пакетов/с
Период пилотных сигналов SRS	10 мс
Мощность пользовательского устройства	23 дБм
Высота пользовательского устройства	1,5 м
Высота базовой станции	30 м

При выделении канальных ресурсов можно воспользоваться зависимостями емкости сети от ширины канала. Пусть в системе есть пользователи с двумя ограничениями на допустимую задержку: D_1^{QoS} и D_2^{QoS} , доли этих пользователей от общего числа равны соответственно α_1 и α_2 ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$), интенсивность генерации трафика у этих пользователей одинакова. Пусть также $C_i(BW)$ – зависимость емкости сети от ширины канала в случае, когда все пользователи имеют ограничение на задержку D_i^{QoS} . Тогда необходимо найти такие BW_1 и BW_2 , чтобы выполнялось равенство $BW_1 + BW_2 = BW$, а значение

$$\min \left\{ \frac{C_1(BW_1)}{\alpha_1}, \frac{C_2(BW_2)}{\alpha_2} \right\}$$

было максимальным. Найденные BW_1 и BW_2 будут являться искомым разбиением канала обеспечивающих максимальную суммарную емкость сети.

4 Численные результаты

4.1 Описание сценария

Для исследования предложенных стратегий группировки пользователей используется среда имитационного моделирования NS-3 [20]. Значения параметров, используемых при моделировании, представлены в таблице 1.

В работе рассматривается сценарий Urban Macro, описанный в спецификации [10]. Пользователи случайным образом располагаются в шестиугольной соте, а базовая станция располагается в одном из углов этого шестиугольника. Размер соты соответствует расстоянию между соседними базовыми станциями в 500 м. Базовая станция использует механизм SIC для декодирования одновременных передач разных пользователей, как в случае использования всеми пользователями общего канала, так и в случае группировки для пользователей внутри групп. Подробное описание работы используемого механизма SIC приведено в работе [9]. Параметры передачи, а

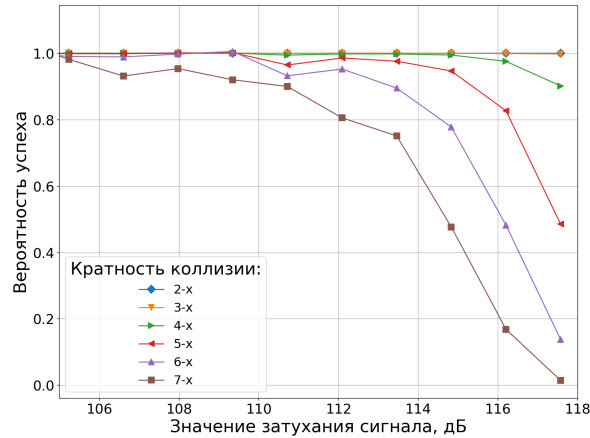


Рис. 1. Вероятность успешной передачи в коллизиях разной кратности.

именно, СКК и количество попыток передачи, назначаются каждому пользователю согласно адаптивному алгоритму, разработанному в работах [9, 16]. Параметры алгоритма для всех пользователей одинаковы и равны $W = 10$ с, $PLR_{high} = 10^{-5}$, $PLR_{low} = 10^{-8,75}$. Для оценки канальных условий каждый пользователь передает пилотные сигналы SRS с периодом 10 мс.

Временная область разделена на мини-слоты, каждый из которых состоит из четырех OFDM-символов. Длительность одного OFDM-символа составляет 35,7 мкс, что соответствует интервалу между поднесущими в 30 кГц. Общая ширина канала составляет 100 МГц и поделена на 256 ресурсных блоков (РБ), которые объединены в группы ресурсных блоков (ГРБ), состоящие из 16 РБ. Мощность пользовательского устройства — 23 дБм. Вся мощность равномерно распределяется пользователем между выбранными для передачи ГРБ. Для моделирования распространения сигнала используется модель Окамура-Хата [21].

Каждый пользователь генерирует пуассоновский поток пакетов размером 32 байта с интенсивностью $\lambda = 150$ пакетов/с. В случае гомогенного трафика все пользователи имеют ограничение на максимальную задержку при доставке пакета равную 1 мс. Поскольку пользователи используют метод Grant-Free с безусловными попытками передачи, а длительность каждой передачи равняется длительности одного мини-слота, такое ограничение на задержку позволяет этим пользователям совершать не более 4 попыток передачи одного пакета. В случае гетерогенного трафика, часть пользователей имеет ограничение на задержку 0,5 мс, что позволяет этим пользователям совершать не более двух попыток передачи. Другие пользователи имеют ограничение на задержку 1 мс. Пользователи с разными допустимыми задержками представлены в эксперименте в отношении 1:1.

В каждом эксперименте для каждого пользователя оценивается доля потерянных пакетов. Если эта величина превышает значение 10^{-5} , то такой

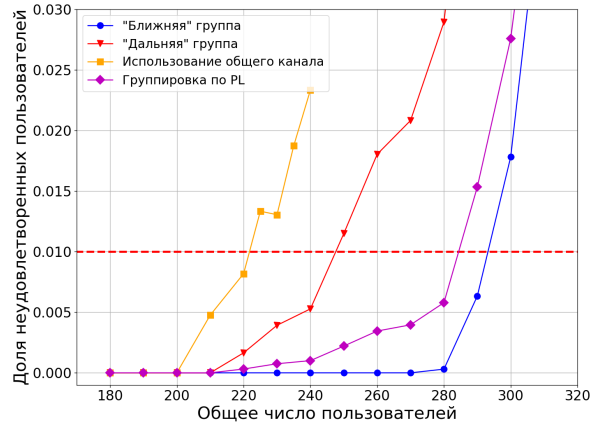


Рис. 2. Емкость сети в сценарии с гомогенным трафиком в случае использования метода группировки с разбиением по PL.

пользователь считается неудовлетворенным. Поскольку интенсивность генерации трафика у всех пользователей одинакова, для удобства емкость сети далее будет измеряться как максимальное число пользователей в сети, при котором доля неудовлетворенных пользователей не превышает 1%.

4.2 Группировка по PL

Для выбора порогового значения величины затухания сигнала для разработанного алгоритма был проведен эксперимент с пользователями, использующими общие каналные ресурсы. На рис. 1 показана вероятность успешной передачи в случае, когда передача пользователя участвует в коллизии с различными кратностями в зависимости от PL пользователя. Результаты показывают, что для пользователей с PL больше 115 дБ вероятность успешной передачи при коллизии кратности больше трех ниже в среднем в 3-4 раза, чем для остальных пользователей. Поэтому в качестве порогового значения PL используется 115 дБ.

В случае равномерного распределения пользователей в шестиугольной соте, доля пользователей с PL меньше 115 дБ составляет примерно 80%. Как уже было отмечено ранее, доля канала, выделяемого «дальней» группе должна быть больше, чем доля пользователей в этой группе. С помощью перебора с шагом, соответствующим одной ГРБ (16 РБ), было найдено разбиение канала 176 РБ для «ближней» группы и 80 РБ для «дальней» группы, обеспечивающее наибольшую суммарную емкость сети.

На рис. 2 изображена доля неудовлетворенных пользователей в зависимости от общего числа пользователей в сети в случае использования всеми пользователями общего канала, а также в случае использования группировки по PL с указанными выше параметрами. Также на графиках представ-

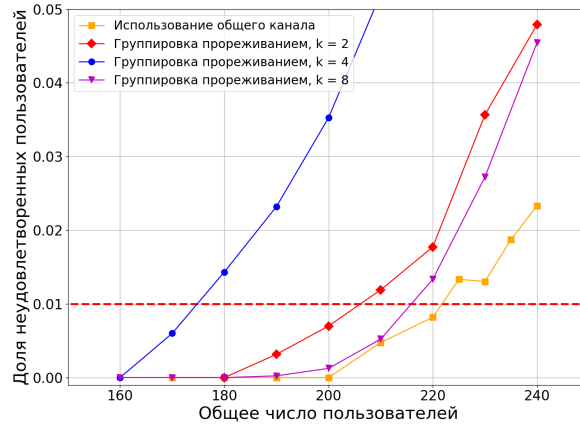


Рис. 3. Емкость сети в сценарии с гомогенным трафиком в случае использования метода объединения пользователей с разными РЛ

лены доли неудовлетворенных пользователей внутри каждой группы при данном значении общего числа пользователей в сети. Пунктирная прямая соответствует доле неудовлетворенных пользователей 1%, и точка пересечения кривых с этой прямой соответствует значению емкости сети согласно используемому определению. Результаты показывают, что достигаемая при использовании группировки емкость сети превышает на 30% емкость в случае, когда все пользователи используют общий канал. Также можно видеть, что доля неудовлетворенных пользователей внутри «дальней» группы выше, чем внутри «ближней» в области емкости. Однако поскольку количество пользователей в «ближней» группе в среднем в 4 раза выше, чем в «дальней», суммарная доля неудовлетворенных пользователей оказывается значительно ниже, чем доля неудовлетворенных пользователей внутри «дальней» группы.

4.3 Группировка прореживанием

На рис.3 приведены зависимости доли неудовлетворенных пользователей от общего числа пользователей в сети для случаев использования группировки прореживанием при $k = 2, 4, 8$, а также для случая использования всеми пользователями общего канала. В случаях группировки каждой группе выделяется соответственно 128, 64 и 32 РБ. Максимальное количество групп в данном случае ограничено тем, что для передачи одного пакета с использованием сигнально-кодовых конструкций, который позволяют обеспечить URLLC-требования к надежности, требуется не менее 32 РБ. Результаты показывают, что группировка прореживанием ни при каком из рассмотренных k не позволяет увеличить емкость сети по сравнению с использованием

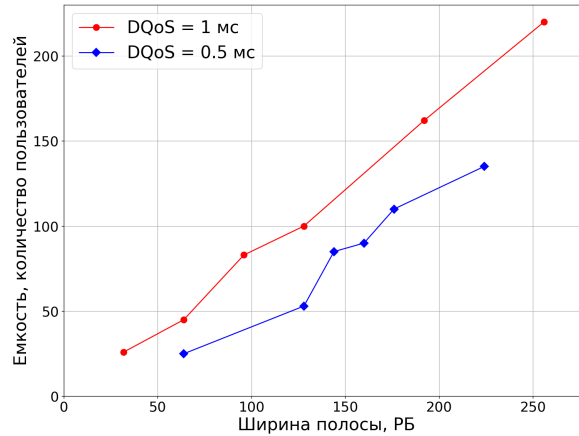


Рис. 4. Емкость сети в зависимости от ширины выделяемого канала для групп пользователей с разными требованиями к качеству обслуживания.

общего канала, что говорит о неэффективности данной стратегии группировки.

4.4 Группировка по типу трафика

На рис. 4 представлены зависимости емкости сети от ширины полосы в РБ, для случая, когда все пользователи имеют одинаковые требования к качеству обслуживания (рассматриваются отдельно случаи $D^{QoS} = 0,5$ мс и $D^{QoS} = 1$ мс). Используя метод, изложенный в разделе 3.3, можно определить, что оптимальным разделением канала является 96 РБ для пользователей с менее строгой допустимой задержкой и 160 РБ для пользователей с более строгим ограничением.

На рис. 5 изображена доля неудовлетворенных пользователей в зависимости от суммарного числа пользователей в сети при использовании алгоритма группировки по типу трафика и в случае использования общего канала, а также доли неудовлетворенных пользователей внутри каждой группы. Результаты показывают, что при использовании найденного разделения канала предложенная стратегия группировки позволяет повысить емкость сети более чем на 40%, по сравнению с использованием общего канала. Кроме того, доли неудовлетворенных пользователей в каждой группе очень близки в области емкости, что свидетельствует об оптимальности выбранного разбиения канала.

5 Заключение

В данной работе исследованы различные стратегии группировки пользователей и выделения каждой группе частотного подканала для сценария об-

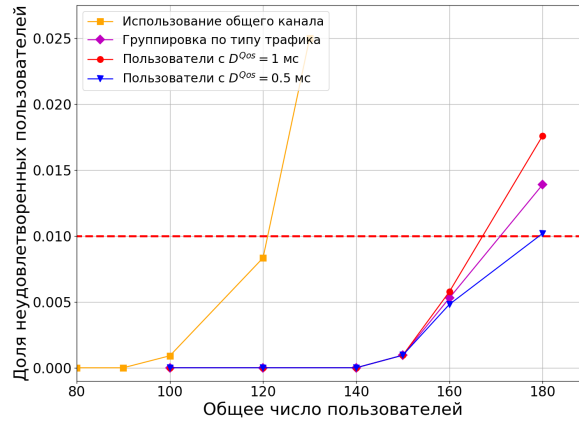


Рис. 5. Емкость сети в сценарии с гетерогенным трафиком в случае использования алгоритма группировки и использования всеми пользователями общего канала.

служивания URLLC-трафика в восходящем канале с использованием метода Grant-Free. Стратегия группировки по PL предлагает объединять в группы пользователей с близкими значениями уровня затухания сигнала. Стратегия группировки прореживанием предлагает группировать пользователей так, чтобы увеличивать разность между уровнями затухания сигналов пользователей в группе. Стратегия группировки по типу трафика предлагает объединять в группы пользователей с одинаковыми требованиями к качеству обслуживания.

Численные результаты, полученные с помощью имитационного моделирования в среде NS-3, показывают, что стратегии группировки по PL и группировки по типу трафика позволяют увеличить емкость сети на 30% и 40% соответственно по сравнению с использованием всеми пользователями общих ресурсов. Стратегия группировки прореживанием не позволяет увеличить емкость сети при всех рассмотренных вариантах количества групп, на которые проводилось разбиение.

В дальнейшем планируется расширить исследование найденных в данной работе эффективных стратегий на случай разбиения пользователей более чем на две группы. Кроме того, планируется разработка алгоритмов адаптивного выбора параметров этих разбиений и определения ширины выделяемых частотных подканалов.

Список литературы

1. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, Recommendation M.2083, ITU-R (September 2015).

2. 5G; NR; Physical layer procedures for data, Technical Specification (TS) 38.214, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2021).
3. 5G; NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification, Technical Specification (TS) 38.321, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2021).
4. Y. Liu, Y. Deng, M. ElKashlan, A. Nallanathan, G. K. Karagiannidis, Analyzing Grant-Free Access for URLLC Service, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 39 (3) (2021) 741–755. doi:10.1109/JSAC.2020.3018822.
5. N. Mahmood, R. Abreu, R. Bohnke, M. Schubert, G. Berardinelli, T. Jacobsen, Uplink Grant-Free Access Solutions for URLLC Services in 5G New Radio, in: *Proceedings of the 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, IEEE, 2019, pp. 607–612. doi:10.1109/ISWCS.2019.8877253.
6. B. Singh, O. Tirkkonen, Z. Li, M. A. Uusitalo, Contention-Based Access for Ultra-Reliable Low Latency Uplink Transmissions, *IEEE Wireless Communications Letters* 7 (2) (2018) 182–185. doi:10.1109/LWC.2017.2763594.
7. G. Berardinelli, N. Mahmood, R. Abreu, T. Jacobsen, K. Pedersen, I. Kovács, P. Mogensen, Reliability Analysis of Uplink Grant-Free Transmission over Shared Resources, *IEEE Access* 6 (2018) 23602–23611. doi:10.1109/ACCESS.2018.2827567.
8. Study on latency reduction techniques for LTE, Technical Report (TR) 36.881, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2016).
9. Шашин А.Э., Белогаев А.А., Красилов А.Н., Выбор параметров передачи URLLC-данных в восходящем канале с использованием общих частотно-временных ресурсов, in: *Сборник трудов 45-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН Информационные Технологии и Системы (ИТиС)*, 2021.
10. 5G; Study on scenarios and requirements for next generation access technologies, Technical Report (TR) 38.913, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2020).
11. M. C. Lucas-Estan, J. Gozalvez, M. Sepulcre, On the Capacity of 5G NR Grant-Free Scheduling with Shared Radio Resources to Support Ultra-Reliable and Low-Latency Communications, *Sensors* 19 (16) (2019) 3575. doi:10.3390/s19163575.
12. T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, P. Mogensen, I. Z. Kovács, T. Madsen, System Level Analysis of Uplink Grant-Free Transmission for URLLC, in: *Proceedings of the IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, IEEE, 2017, pp. 1–6. doi:10.1109/GLOCOMW.2017.8269137.
13. T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, I. Z. Kovács, P. E. Mogensen, System Level Analysis of K-repetition for Uplink Grant-Free URLLC in 5G NR, in: *Proceedings of the 25th European Wireless Conference, VDE*, 2019, pp. 96–100.
14. T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, I. Z. Kovács, P. Mogensen, Joint Resource Configuration and MCS Selection Scheme for Uplink Grant-Free URLLC, in: *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2018, pp. 1–6. doi:10.1109/GLOCOMW.2018.8644377.
15. S. Ozaku, Y. Shimbo, H. Suganuma, F. Maehara, Adaptive Repetition Control Using Terminal Mobility for Uplink Grant-Free URLLC, in: *Proceedings of the IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, IEEE, 2020, pp. 1–5. doi:10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128403.
16. A. Shashin, A. Belogaev, A. Krasilov, E. Khorov, Adaptive Transmission Parameters Selection Algorithm for URLLC Traffic in Uplink, in: *2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*, 2020, pp. 1–5. doi:10.1109/EnT50437.2020.9431311.

17. M. S. Ali, H. Tabassum, E. Hossain, Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems, *IEEE Access* 4 (2016) 6325–6343. doi:10.1109/ACCESS.2016.2604821.
18. A. Celik, M.-C. Tsai, R. M. Radaydeh, F. S. Al-Qahtani, M.-S. Alouini, Distributed User Clustering and Resource Allocation for Imperfect NOMA in Heterogeneous Networks, *IEEE Transactions on Communications* 67 (10) (2019) 7211–7227. doi:10.1109/TCOMM.2019.2927561.
19. W. A. Al-Hussaibi, F. H. Ali, Efficient User Clustering, Receive Antenna Selection, and Power Allocation Algorithms for Massive MIMO-NOMA Systems, *IEEE Access* 7 (2019) 31865–31882. doi:10.1109/ACCESS.2019.2902331.
20. The ns-3 network simulator.
URL <http://www.nsnam.org/>
21. M. Hata, Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 29 (3) (1980) 317–325. doi:10.1109/T-VT.1980.23859.

Выбор параметров обслуживания URLLC-трафика в восходящем канале в сценарии высокой мобильности пользователей*

Шашин А.Э., Красилов А.Н.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
{ashashin, akrasilov}@hse.ru

Аннотация Большое количество сценариев использования сервиса сверхнадежной связи с низкой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC) включают в себя пользователей, обладающих высокой мобильностью. Базовая станция должна назначать пользователям параметры передачи в восходящем канале, которые с одной стороны позволят выполнить строгие требования URLLC к качеству обслуживания, а с другой стороны потребляют наименьший объем канальных ресурсов. При выборе параметров обслуживания в сценарии с высокой мобильностью необходимо учитывать следующие особенности. Во-первых, расстояние между пользователями и базовой станцией значительно меняется со временем, а значит, средняя мощность сигнала на базовой станции от пользователя также будет значительно меняться со временем. Во-вторых, при подключении нового пользователя у базовой станции отсутствуют измерения качества канала для данного пользователя. В данной работе исследована эффективность разработанного ранее авторами алгоритма выбора параметров передачи и предложена настройка параметров алгоритма, позволяющая учесть особенности сценария с высокой мобильностью. Численные результаты показывают, что предложенный алгоритм позволяет снизить потребление канальных ресурсов по сравнению с использованием фиксированных параметров передачи.

Keywords: 5G, URLLC, восходящий канал, Grant-Free, высокая мобильность

1 Введение

Важным новым сервисом, предоставляемым сотовыми сетями пятого поколения 5G, является сервис сверхнадежной связи с низкой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC). Такой сервис необходим для множества современных приложений, требующих передачу данных с задержкой порядка 1 мс и надежностью не менее 99,999% [1].

* Исследование выполнено в НИУ ВШЭ за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10158, <https://rscf.ru/project/21-79-10158/>

Во многих сценариях использования сервиса URLLC пользователи передают данные в восходящем канале. Для сокращения задержки в восходящем канале спецификации сетей 5G [2, 3] вводят метод доступа к каналу без запроса полосы (англ.: grant-free). Согласно этому методу базовая станция заранее конфигурирует частотно-временные ресурсы и параметры передачи, такие как сигнально-кодовая конструкция (СКК) и количество попыток передачи. При появлении данных пользователь осуществляет передачу с использованием сконфигурированных частотно-временных ресурсов и параметров. Для увеличения надежности пользователь может осуществить несколько попыток передачи одного пакета данных. При этом для снижения задержки пользователь может не дожидаться подтверждения успешности каждой предыдущей попытки от базовой станции, а выполнить несколько безусловных попыток передачи. В ряде работ [4, 5] показано, что использование безусловных попыток передачи позволяет значительно снизить задержку и при этом выполнить требования URLLC-приложений к надежности доставки пакетов.

При назначении частотно-временных ресурсов необходимо учитывать особенности обслуживаемого трафика. В случае, когда пользователи генерируют строго периодический трафик, каждому пользователю можно выделить частотно-временные ресурсы так, чтобы ресурсы разных пользователей не пересекались [6–8]. Это позволит избежать коллизий между передачами различных пользователей. В случае аperiodического трафика такое назначение ресурсов является неэффективным, ввиду возможного отсутствия данных для передачи в зарезервированные моменты времени. В данной работе рассматривается случай строго периодического трафика.

Большое количество сценариев использования сервиса URLLC предполагает наличие пользователей с высокой мобильностью, то есть пользователей, расположение которых относительно базовой станции сильно меняется со временем. Примером таких сценариев являются интеллектуальные транспортные системы [9]. В таких сценариях при назначении параметров передачи базовая станция должна учитывать следующие особенности. Во-первых, в сценарии с высокой мобильностью расстояние между пользователем и базовой станцией значительно меняется со временем, а значит, средняя мощность сигнала на базовой станции от пользователя также будет значительно меняться со временем. Во-вторых, при подключении нового пользователя у базовой станции отсутствуют измерения качества канала для данного пользователя. Базовая станция должна назначать пользователям параметры передачи в восходящем канале, которые с одной стороны позволят удовлетворить строгие требования URLLC-приложений к качеству обслуживания, а с другой стороны потребляют наименьший объем канальных ресурсов, поскольку высокий объем потребляемых канальных ресурсов ограничивает количество пользователей, которые могут быть одновременно обслужены сетью.

В работе [10] авторами был предложен адаптивный алгоритм выбора параметров передачи, позволяющий уменьшить потребление канальных ре-

сурсов при выполнении требований к качеству обслуживания по сравнению с другими существующими решениями. Однако ранее этот алгоритм исследовался только в сценариях с низкой мобильностью. Целью данной работы является исследование эффективности этого алгоритма в сценарии с высокой мобильностью и определение параметров алгоритма, позволяющих снизить потребление канальных ресурсов по сравнению с существующими решениями, представленными в литературе.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 представлено современное состояние исследований по теме выбора параметров передачи URLLC-данных в восходящем канале. В разделе 3 приводится описание рассматриваемого алгоритма выбора параметров передачи. В разделе 4 представлены результаты исследования эффективности алгоритма в сценарии с высокой мобильностью пользователей. В разделе 5 резюмируются основные результаты работы.

2 Обзор литературы

Распространенным в литературе подходом к выбору параметров передачи является назначение фиксированных параметров (СКК и количество попыток передачи) всем пользователям независимо от их расположения относительно базовой станции и канальных условий. Такие параметры могут быть выбраны с использованием аналитических или имитационных моделей.

В работах [4, 11, 12] представлены аналитические модели, которые оценивают вероятность потери пакета при заданных параметрах передачи. Однако при оценке этой вероятности используются упрощенные модели ошибок, согласно которым пакет считается потерянным только в случае коллизии с пакетом другого пользователя, либо если отношение сигнал/шум на приемнике ниже некоторого порогового значения. Такие модели не соответствуют реальным зависимостям вероятности потери пакета от отношения сигнал/шум на приемнике для разных СКК. Отметим, что при рассмотрении URLLC-сценариев необходимо учитывать вероятности потери пакета порядка 10^{-5} , что невозможно при использовании пороговых моделей. Кроме того, в этих работах рассматривается только плоский частотный канал, тогда как в реальности канал подвержен частотно селективным замираниям.

В работах [13, 14] выбор параметров передачи осуществляется с использованием имитационного моделирования. Имитационные модели позволяют точнее оценить вероятность потери пакетов, поскольку в них используются реалистичные модели канала и ошибок. Однако расчет вероятности потери пакета для всех возможных конфигураций параметров передачи, занимает значительное время, поэтому имитационные модели нельзя использовать для выбора параметров в режиме реального времени.

Во всех упомянутых выше работах вне зависимости от расположения пользователя предлагается выбирать одни и те же параметры. Однако пользователи могут находиться в разных канальных условиях, поэтому единые параметры обычно соответствуют пользователю с наихудшими канальными

условиями. Заметим, что такой подход приводит к неэффективному использованию канальных ресурсов остальными пользователями, что ограничивает максимально допустимое количество пользователей, одновременно обслуживаемых базовой станцией. По этой причине в работах [10, 15, 16] предлагаются алгоритмы, которые адаптивно выбирают параметры передачи для каждого пользователя.

Авторы работы [15] предлагают адаптивно выбирать СКК для каждого пользователя, используя набор пороговых значений для мощности принимаемого сигнала (чем меньше мощность, тем надежнее СКК). Однако авторы не предлагают способ выбора этих пороговых значений, а также алгоритм выбора количества попыток передачи. Кроме того, авторы проводили исследование только в сценарии с низкой мобильностью пользователей.

В работе [16] предлагается адаптивно выбирать количество попыток передачи в зависимости от измеренной на базовой станции временной корреляции приходящего от пользователя сигнала. Количество попыток передачи предлагается уменьшать в случае низкой корреляции (сценария с высокой мобильностью). При этом всем пользователям предлагается использовать одну и ту же СКК, что является существенным недостатком предлагаемого подхода. Кроме того, в случае, когда все пользователи имеют одинаковую мобильность, им всем будет назначено одинаковое количество попыток передачи, а значит в этом случае данный алгоритм не отличается от фиксированного выбора параметров.

Ранее авторами данной работы был предложен адаптивный алгоритм совместного выбора СКК и количества попыток передачи в зависимости от канальных условий пользователя [10]. Краткое описание этого алгоритма приведено в разделе 3. Однако эффективность алгоритма была исследована только в сценарии с низкой мобильностью пользователей. В данной работе исследуется эффективность алгоритма в сценарии с высокой мобильностью пользователей и предложены методы выбора параметров данного алгоритма, позволяющие снизить объем потребляемых канальных ресурсов по сравнению с существующими алгоритмами выбора параметров передачи.

3 Алгоритм выбора параметров передачи

Адаптивный алгоритм совместного выбора СКК и количества попыток передачи в зависимости от канальных условий пользователя подробно описан в работе [10]. В данном разделе приводится краткое описание этого алгоритма, а также анализ влияния различных параметров алгоритма на его производительность в сценарии с высокой мобильностью пользователей.

3.1 Описание алгоритма

В основе алгоритма лежит периодическое измерение канальных условий с использованием пилотных сигналов SRS (англ.: Sounding Reference Signals). На основе этих пилотных сигналов базовая станция оценивает отношение

сигнал/шум в каждом ресурсном блоке. Далее на базе этих измерений базовая станция оценивает вероятность потери пакета $PLR_{M,K}(t)$ для каждой комбинации параметров $\{M, K\}$, где M – индекс СКК, K – количество попыток передачи, t – момент времени получения SRS. Процедура выбора параметров различается в зависимости от фазы алгоритма.

Фаза обучения При подключении нового пользователя к сети базовая станция не имеет актуальной оценки качества канала для этого пользователя, потому она конфигурирует для этого пользователя начальные параметры. Эти параметры используются пользователем в течение длительности окна усреднения W . При получении каждого пилотного сигнала SRS базовая станция рассчитывает усредненные оценки вероятности потери пакета методом экспоненциального скользящего среднего для каждой комбинации параметров $\{M, K\}$:

$$\widehat{PLR}_{M,K}(t) = \frac{1}{w} PLR_{M,K}(t) + \left(1 - \frac{1}{w}\right) \widehat{PLR}_{M,K}(t - T_{SRS}).$$

где T_{SRS} – период отправления пилотных сигналов SRS, $w = \frac{W}{T_{SRS}}$. Отметим, что чем больше значение W , тем на более длительное время мгновенные оценки $PLR_{M,K}(t)$ оказывают влияние на усредненные оценки $\widehat{PLR}_{M,K}(t)$. После истечения времени W начинается фаза выбора параметров.

Фаза выбора параметров Базовая станция продолжает обновлять оценки $\widehat{PLR}_{M,K}(t)$ при получении каждого сигнала SRS. После каждого обновления оценок базовая станция осуществляет выбор параметров. Чтобы избежать эффекта частого переключения при выборе параметров используется гистерезисный подход. А именно, базовая станция использует два пороговых значения PLR_{high} и PLR_{low} , которые являются параметрами алгоритма, следующим образом:

- изначально все конфигурации параметров помечаются как неподходящие;
- если в момент времени t оценка $\widehat{PLR}_{M,K}(t)$ конфигурации $\{M, K\}$ становится ниже порога PLR_{low} , она помечается подходящей;
- если в момент времени t оценка $\widehat{PLR}_{M,K}(t)$ подходящей конфигурации $\{M, K\}$ становится выше порога PLR_{high} , она помечается неподходящей;
- для всех подходящих конфигураций определяется количество используемых групп ресурсных блоков (ГРБ) $R_M \cdot K$, где R_M – количество используемых ГРБ для передачи пакета с использованием СКК M .
- среди подходящих выбирается конфигурация, обеспечивающая минимальное потребление канальных ресурсов.

Рис. 1 иллюстрирует процесс переходов конфигурации параметров между состояниями «подходящая» и «неподходящая».

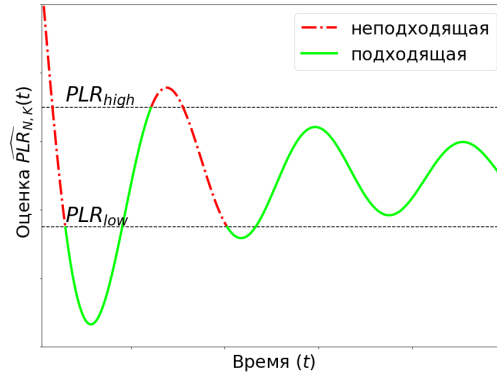


Рис. 1. Выбор подходящих конфигураций параметров.

3.2 Анализ влияния параметров алгоритма в сценарии высокой мобильности

При использовании алгоритма в сценарии с высокой мобильности необходимо учитывать следующие особенности. Во-первых, длительность фазы обучения W должна быть значительно меньше, чем среднее время обслуживания пользователя в данной соте. Кроме того, поскольку в таком сценарии качество канала значительно меняется со временем, использования низких значений окна усреднения W позволяет осуществлять выбор параметров используя более актуальные измерения качества канала. Однако, использование слишком маленьких значений W может приводить к неточным оценкам доли потерянных пакетов ввиду недостаточного объема используемой статистики, что в свою очередь может приводить к выбору параметров, которые не позволяют удовлетворить URLLC-требования к качеству обслуживания.

Во-вторых, выбор начальных параметров оказывает значительное влияние на объем потребляемых ресурсов в фазе обучения. Для гарантированного обеспечения URLLC-требований базовая станция может назначать наиболее надежную СКК и максимально допустимое количество попыток в качестве начальных параметров. Однако, такой выбор параметров приводит к высокому потреблению канальных ресурсов. Наиболее подходящим для начальных параметров является использование фиксированных параметров, которые позволяют удовлетворить URLLC-требования в любой точке внутри соты, и при этом потребляют наименьшее количество канальных ресурсов. Для выбора начальных параметров базовая станция может использовать параметры, назначаемые пользователям в данной соте в течение длительного времени.

В-третьих, параметр PLR_{high} используется алгоритмом для обнаружения ситуации, когда используемая конфигурация параметров перестала удовлетворять требованиям к качеству обслуживания. В сценарии с низкой мобильностью предлагалось устанавливать этот параметр в значение, соответ-

Таблица 1. Параметры моделирования

Параметр	Значение
Несущая частота	2 ГГц
Расстояние между поднесущими	15 кГц
Ширина канала	50 МГц, 16 ГРБ
Длительность мини-слота	142,8 мкс
Размер пакета	32 байта
Период генерации пакетов	10 мс
Период пилотных сигналов SRS	5 мс
Мощность пользовательского устройства	23 дБм
Высота пользовательского устройства	1,5 м
Высота базовой станции	30 м
Скорость движения пользователя	60 км/ч
Модель распространения сигнала	Окамура-Хата [17]
Модель частотно-селективных замираний	EVA, 60 км/ч [18]
Время моделирования	10^4 с
Максимальное число попыток передачи	4

ствующие допустимой вероятности потери пакета [10]. Однако, в сценарии с высокой мобильностью, необходимо учитывать, что в случае ухудшения канальных условий требуется проводить измерения и оценивать вероятность потери пакета в течении некоторого времени ввиду использования экспоненциального усреднения. Однако в течение этого времени требования к качеству обслуживания могут быть нарушены. Поэтому, в таких сценариях следует использовать более низкие значения PLR_{high} , что позволит алгоритму заранее переключаться с конфигурации, которая может перестать удовлетворять требованиям в ближайшее время.

4 Численные результаты

4.1 Описание сценария

Для исследования разработанного алгоритма используется среда имитационного моделирования NS-3 [19]. В рассматриваемом сценарии пользователи генерируют строго периодический трафик. Как уже было отмечено в разделе 1, в этом случае каждому пользователю можно выделить канальные ресурсы так, чтобы они не пересекались с ресурсами других пользователей. В связи с этим при моделировании достаточно рассматривать одного пользователя.

В работе рассматривается сценарий Urban Macro, описанный в спецификации [20]. Пользователь случайным образом перемещается в шестиугольной соте, а базовая станция располагается в одном из углов этого шестиугольника. Размер соты соответствует расстоянию между соседними базовыми станциями в 500 м. Пользователь движется по прямой со скоростью

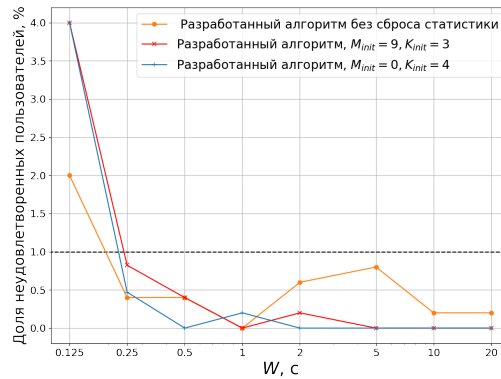


Рис. 2. Доля неудовлетворенных пользователей, обеспечиваемая при различных параметрах алгоритма.

60 км/ч. Таким образом, максимальное время, в течении которого пользователь может двигаться от границы до границы соты составляет 20 секунд. При достижении границы соты пользователь продолжает движение в случайном направлении внутри соты. При этом, при использовании разработанного алгоритма выбора параметров передачи, накопленная статистика вероятностей потери пакета сбрасывается, и алгоритм начинает работу с фазы обучения. Таким образом моделируется перемещение пользователей между разными сотами.

Значения параметров, используемых при моделировании, представлены в Таблице 1. Рассматриваются следующие требования к доставке URLLC-пакетов: пакеты должны быть доставлены в течение интервала времени 1 мс с вероятностью более 99,999%. Длительность эксперимента составляет 10^4 секунд, за это время пользователь передает 10^6 пакетов. Количество независимых прогонов модели равно 500. Если по результатам прогона доля потерянных пакетов для пользователя превышает 10^{-5} , такой пользователь считается неудовлетворенным. По результатам всех прогонов оценивается доля неудовлетворенных пользователей.

4.2 Анализ численных результатов

Для оценки влияния параметров алгоритма на его эффективность параметр W варьировался от 0,125 до 20 секунд, параметры PLR_{high} и PLR_{low} от 10^{-5} до 10^{-10} . После этого для каждого значения W перебором была найдена комбинация PLR_{high} и PLR_{low} , которая обеспечивает не превышающую 1% долю неудовлетворенных пользователей (данный порог выбран в соответствии с определением емкости сети, предложенном 3GPP в [20]) и минимальное потребление канальных ресурсов.

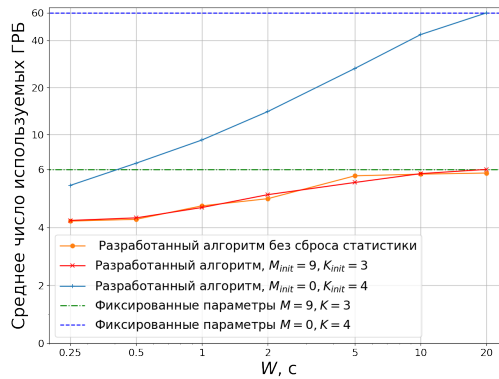


Рис. 3. Потребление канальных ресурсов при использовании алгоритма в сравнении с фиксированными параметрами.

В экспериментах анализируются следующие решения:

- Фиксированные параметры $M = 0, K = 4$ — пользователь используют наиболее надежные фиксированные параметры передачи.
- Фиксированные параметры $M = 9, K = 3$ — пользователь используют фиксированные параметры передачи, которые были найдены полным перебором как обеспечивающие не превышающую 1% долю неудовлетворенных пользователей и наименьшее потребление канальных ресурсов.
- Разработанный алгоритм $M_{init} = 0, K_{init} = 4$ — пользователь использует разработанный алгоритм с наиболее надежными начальными параметрами.
- Разработанный алгоритм $M_{init} = 9, K_{init} = 3$ — пользователь использует разработанный алгоритм с начальными параметрами, которые соответствуют лучшим фиксированным параметрам.
- Разработанный алгоритм без сброса статистики — пользователь использует разработанный алгоритм и при этом не сбрасывает накопленную алгоритмом статистику при достижении границы соты. При использовании данного решения алгоритм выполняет фазу обучения только один раз, что позволяет исследовать влияние фазы обучения на эффективность алгоритма при сравнении с другими решениями.

На рис. 2 представлена доля неудовлетворенных пользователей в зависимости от параметра W . Результаты показывают, что при уменьшении значения W алгоритм удовлетворяет требование для доли неудовлетворенных пользователей вплоть до значения $W = 0,25$ с. При меньших значениях W используемой алгоритмом статистики оказывается недостаточно для корректной оценки вероятности потери пакета.

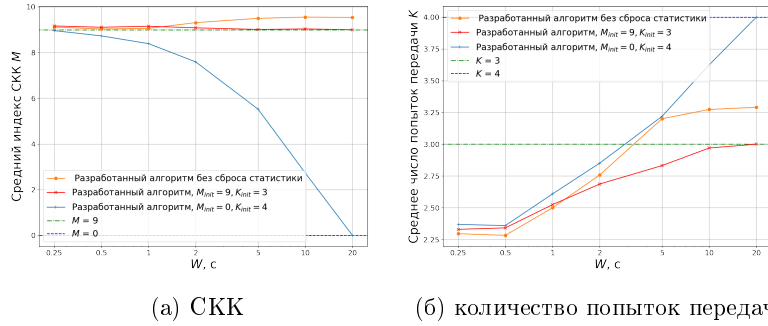


Рис. 4. Средние выбираемые алгоритмом параметры передачи.

На рис. 3 представлено среднее число потребляемых ГРБ при использовании описанных выше решений. Результаты показывают, что при увеличении W обеспечиваемое алгоритмом потребление ресурсов стремится к начальным значениям, так как с ростом W увеличивается доля времени, проводимого алгоритмом в фазе обучения. При значении $W = 20$ с фаза обучения занимает все время, в течении которого пользователь находится в соте. С уменьшением W обеспечиваемое алгоритмом потребление канальных ресурсов снижается, так как алгоритм адаптивно подстраивается под изменяющиеся канальные условия. При использовании самых надежных параметров в качестве начальных, потребление канальных ресурсов оказывается значительно выше, чем при использовании алгоритма без сброса статистики из-за высокого потребления в течении фазы обучения. Однако при использовании лучших фиксированных параметров в качестве начальных, алгоритму удастся достичь такого же потребления канальных ресурсов, как и при использовании алгоритма без сброса статистики. Кроме того, алгоритм позволяет достичь на 30% меньшего потребления канальных ресурсов, чем при использовании лучших фиксированных параметров.

Как уже было отмечено, поиск лучших фиксированных параметров в конкретном сценарии является нетривиальной задачей. Разработанный алгоритм может быть использован для решения данной задачи. На рис. 4 представлены средние выбираемые алгоритмом параметры передачи. Можно видеть, что параметры, выбираемые алгоритмом при высоких значениях W в случае использования алгоритма без сброса статистики, близки к лучшим фиксированным параметром. Это означает, что базовая станция может использовать усредненные в широком окне значения параметров передачи, назначаемые всем пользователям в данной соте без учета фазы обучения и использовать эти параметры в качестве начальных при подключении новых пользователей к сети. Тем самым может быть достигнуто наименьшее потребление канальных ресурсов.

На рис. 5 представлены найденные перебором параметры PLR_{high} и PLR_{low} для случая использования алгоритма с лучшими фиксированными

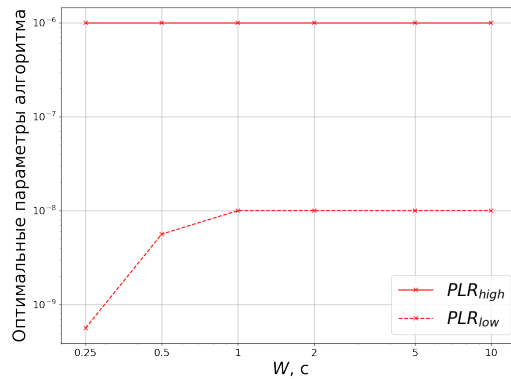


Рис. 5. Оптимальные значения параметров PLR_{high} и PLR_{low} при использовании алгоритма с начальными параметрами $M_{init} = 9$ и $K_{init} = 3$.

параметрами в качестве начальных. Можно видеть, что значение PLR_{high} равно 10^{-6} при всех W . Это значение ниже, чем допустимая доля потерянных пакетов, поскольку такой PLR_{high} позволяет алгоритму заранее переключаться с параметров передачи, которые в ближайшем будущем перестанут удовлетворять требованиям к качеству обслуживания. Значение параметра PLR_{low} уменьшается с уменьшением W , поэтому его нужно выбирать в зависимости от используемого W в соответствии с полученной кривой.

5 Заключение

В данной работе был исследован адаптивный алгоритм выбора параметров передачи в сценарии с высокой мобильностью пользователей, генерирующих строго периодический трафик. Исследование влияния параметров алгоритма показало важность учета особенностей сценария с высокой мобильностью пользователей, таких как быстрое изменение канальных условий и отсутствие статистики оценки канала при подключении нового пользователя к сети. Численные результаты показали, что благодаря адаптивному выбору параметров в зависимости от канальных условий, алгоритм позволяет снизить на 30% потребление канальных ресурсов по сравнению использованием фиксированных параметров, найденных полным перебором как обеспечивающих наименьшее потребление канальных ресурсов.

В дальнейшем планируется расширить исследование на сценарий, в котором пользователи генерируют аperiodический трафик и обладают высокой мобильностью. В этом сценарии всем пользователям выделяются общие канальные ресурсы. При выборе параметров необходимо учитывать возможную интерференцию между передачами разных пользователей и переменное количество пользователей в сети.

Список литературы

1. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, Recommendation M.2083, ITU-R (September 2015).
2. 5G; NR; Physical layer procedures for data, Technical Specification (TS) 38.214, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2021).
3. 5G; NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification, Technical Specification (TS) 38.321, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2021).
4. Y. Liu, Y. Deng, M. ElKashlan, A. Nallanathan, G. K. Karagiannidis, Analyzing Grant-Free Access for URLLC Service, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 39 (3) (2021) 741–755. doi:10.1109/JSAC.2020.3018822.
5. N. Mahmood, R. Abreu, R. Bohnke, M. Schubert, G. Berardinelli, T. Jacobsen, Uplink Grant-Free Access Solutions for URLLC Services in 5G New Radio, in: *Proceedings of the 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, IEEE, 2019, pp. 607–612. doi:10.1109/ISWCS.2019.8877253.
6. N. H. Mahmood, R. Abreu, R. Böhnke, M. Schubert, G. Berardinelli, T. H. Jacobsen, Uplink Grant-Free Access Solutions for URLLC services in 5G New Radio, in: *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2019, pp. 607–612. doi:10.1109/ISWCS.2019.8877253.
7. D. Feng, L. Lai, J. Luo, Y. Zhong, C. Zheng, K. Ying, Ultra-reliable and low-latency communications: applications, opportunities and challenges, *Science China Information Sciences* 64 (2) (2021) 1–12. doi:10.1007/s11432-020-2852-1.
8. D. Jiang, H. Wang, E. Malkamaki, E. Tuomaala, Principle and Performance of Semi-Persistent Scheduling for VoIP in LTE System, in: *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007*, pp. 2861–2864. doi:10.1109/WICOM.2007.710.
9. H. Ullah, N. G. Nair, A. Moore, C. Nugent, P. Muschamp, M. Cuevas, 5G communication: an overview of vehicle-to-everything, drones, and healthcare use-cases, *IEEE Access* 7 (2019) 37251–37268. doi:10.1109/ACCESS.2019.2905347.
10. A. Shashin, A. Belogaev, A. Krasilov, E. Khorov, Adaptive Transmission Parameters Selection Algorithm for URLLC Traffic in Uplink, in: *2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*, 2020, pp. 1–5. doi:10.1109/EnT50437.2020.9431311.
11. B. Singh, O. Tirkkonen, Z. Li, M. A. Uusitalo, Contention-Based Access for Ultra-Reliable Low Latency Uplink Transmissions, *IEEE Wireless Communications Letters* 7 (2) (2018) 182–185. doi:10.1109/LWC.2017.2763594.
12. M. C. Lucas-Estan, J. Gozalvez, M. Sepulcre, On the Capacity of 5G NR Grant-Free Scheduling with Shared Radio Resources to Support Ultra-Reliable and Low-Latency Communications, *Sensors* 19 (16) (2019) 3575. doi:10.3390/s19163575.
13. T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, P. Mogensen, I. Z. Kovacs, T. Madsen, System Level Analysis of Uplink Grant-Free Transmission for URLLC, in: *Proceedings of the IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, IEEE, 2017, pp. 1–6. doi:10.1109/GLOCOMW.2017.8269137.
14. T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, I. Z. Kovács, P. E. Mogensen, System Level Analysis of K-repetition for Uplink Grant-Free URLLC in 5G NR, in: *Proceedings of the 25th European Wireless Conference, VDE*, 2019, pp. 96–100.
15. T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, I. Z. Kovács, P. Mogensen, Joint Resource Configuration and MCS Selection Scheme for Uplink Grant-Free URLLC, in: *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2018, pp. 1–6. doi:10.1109/GLOCOMW.2018.8644377.

16. S. Ozaku, Y. Shimbo, H. Sukanuma, F. Maehara, Adaptive Repetition Control Using Terminal Mobility for Uplink Grant-Free URLLC, in: Proceedings of the IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE, 2020, pp. 1–5. doi:10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128403.
17. M. Hata, Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services, IEEE Transactions on Vehicular Technology 29 (3) (1980) 317–325. doi:10.1109/T-VT.1980.23859.
18. Base Station (BS) radio transmission and reception, Technical specification (TS) 36.104, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2019).
19. The ns-3 network simulator.
URL <http://www.nsnam.org/>
20. 5G; Study on scenarios and requirements for next generation access technologies, Technical Report (TR) 38.913, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2020).

Исследование алгоритмов балансировки AR/VR-трафика в сетях 5G с функцией множественного подключения*

М.В. Суслопаров, А.Н. Красилов, Е.М. Хоров

{susloparov, krasilov, khorov}@wireless.iitp.ru

Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича
Российской академии наук

Аннотация В настоящее время стремительно растут объемы трафика, генерируемого приложениями дополненной и виртуальной реальности (англ.: Augmented and Virtual Reality, AR/VR). Такие приложения предъявляют строгие требования к качеству обслуживания, а именно, к пропускной способности, задержке и надежности доставки данных. Для обслуживания больших объемов AR/VR-трафика могут использоваться сотовые сети пятого поколения (5G), поддерживающие передачу данных в миллиметровом диапазоне частот. Однако из-за значительной флуктуации пропускной способности каналов в миллиметровом диапазоне требования AR/VR-приложений к надежности и времени доставки данных могут быть не выполнены. Одним из возможных решений данной проблемы является использование функции множественного подключения пользователя к нескольким базовым станциям, работающих, в том числе, в низкочастотном диапазоне. В данной работе исследуются различные способы подключения пользовательского устройства к нескольким базовым станциям, работающих в миллиметровом и низкочастотном диапазонах, а также алгоритмы балансировки трафика между ними. Показаны сценарии, в которых функция множественного подключения и алгоритм балансировки трафика позволяют обеспечить выполнение строгих требований к качеству обслуживания AR/VR-трафика и снижение потребления канальных ресурсов как миллиметрового, так и низкочастотного каналов, по сравнению со случаями одиночного и двойного подключения.

Ключевые слова: 5G, mmWave, AR/VR, multi-connectivity, балансировка трафика

1 Введение

За последние несколько лет значительно выросла доля обслуживаемого трафика реального времени, генерируемого такими приложениями, как серви-

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда №21-79-10431, <https://rscf.ru/project/21-79-10431/>

сы аудио- и видеосвязи, видеоигры, удаленное управление роботами и др. Весомую долю трафика реального времени в ближайшем будущем будет составлять трафик приложений дополненной и виртуальной реальности (англ.: Augmented and Virtual Reality, AR/VR) — приложений, предназначенных для иммерсивного взаимодействия пользователя с виртуальным трехмерным пространством. Облачные сервисы виртуальной и дополненной реальности (англ.: Cloud AR/VR) генерируют AR/VR-видеопоток на удаленных серверах и передают его пользователю. Такие сервисы позволяют значительно снизить расходы пользователя на поддержание инфраструктуры.

Приложения AR/VR предъявляют строгие требования к качеству обслуживания, а именно к задержке и надежности доставки данных. Помимо этого, при генерации видеопотока высокого качества для его передачи необходима высокая пропускная способность. Если хотя бы один из пакетов видеокadra не дошел до получателя вовремя, кадр не отображается, что приводит к снижению качества восприятия изображения пользователем. В связи с этим возникает необходимость обслуживать AR/VR-трафик с низкой задержкой и практически без потерь пакетов. В спецификации 3GPP [1] в качестве модели нисходящего трафика AR/VR-приложения рассмотрен видеопоток со средней скоростью генерации данных 45 Мбит/с, средней частотой кадров 60 кадр/с и требованием к максимальной задержке 20 мс, а также требованием к доле потерянных кадров не больше 1%. В отчете компании Huawei [2] приведены рекомендованные требования к качеству обслуживания облачного трафика VR. Согласно данному документу, видеопоток разрешения 4K и частоты кадров 60 кадр/с должен передаваться со скоростью не менее 50 Мбит/с и задержкой не более 20 мс.

Для выполнений строгих требований к качеству обслуживания AR/VR-трафика возможно использовать сотовые сети пятого поколения (5G). Базовые станции сетей 5G могут работать либо в низкочастотном диапазоне (до 6 ГГц), либо в так называемом миллиметровом диапазоне частот (от 24 до 71 ГГц). Использование миллиметрового диапазона позволяет многократно повысить пропускную способность канала за счет наличия широких (более 1 ГГц) частотных каналов в данном диапазоне. Однако мощность сигнала, передаваемого в миллиметровом канале, существенно снижается при удалении пользовательского устройства от базовой станции [3] или появлении препятствия между пользовательским устройством и базовой станцией [4]. Поэтому для выполнения строгих требований к качеству обслуживания трафика AR/VR использование исключительно миллиметрового диапазона недостаточно [5].

Одним из способов повышения надежности доставки данных является использование функции двойного подключения (англ.: Dual Connectivity, DC) [6], позволяющую подключить пользовательское устройство к двум базовым станциям, работающим в различных частотных диапазонах. Как правило, базовая станция, работающая в низкочастотном диапазоне (далее называемая низкочастотной базовой станцией) выполняет функцию контроля подключения пользователя к базовым станциям. При нахождении пользо-

вательского устройства в зоне покрытия нескольких базовых станций, работающих в миллиметровом диапазоне частот (далее называемых миллиметровыми базовыми станциями) низкочастотная базовая станция выбирает одну из них в качестве активной для подключения к ней пользовательского устройства. Если качество канала одной из неактивных миллиметровых станций превосходит качество канала для активной миллиметровой станции, пользовательское устройство переключается на данную неактивную станцию с помощью процедуры хэндовера (англ.: handover).

Заметим, что процедура хэндовера, включающая процедуры синхронизации и подключения пользовательского устройства к базовой станции, может занимать несколько десятков миллисекунд, в течение которых базовые станции, участвующие в данной процедуре, не отправляют данные, что приводит к значительной задержке во времени доставки нескольких видеокадров. Одним из способов решения данной проблемы является подключение пользовательского устройства к низкочастотной и нескольким миллиметровым базовым станциям с помощью функции множественного подключения (англ: Multi-Connectivity, MC) [7]. При таком подходе пользовательское устройство подключено одновременно к нескольким миллиметровым базовым станциям, а изменение используемой для передачи данных миллиметровой базовой станции может происходить практически мгновенно на основе оценки качества соответствующих каналов. Также при использовании функции множественного подключения появляется возможность значительно повысить надежность доставки данных за счет использования всех доступных беспроводных каналов. Однако такой подход может значительно повысить долю потребляемых канальных ресурсов.

При подключении пользователя к нескольким базовым станциям низкочастотная базовая станция реализует алгоритм балансировки трафика между базовыми станциями. Как будет показано в данной работе, выбор алгоритма балансировки трафика существенно влияет на качество обслуживания AR/VR-трафика и объем потребляемых канальных ресурсов. Отметим, что обеспечение низкого объема потребляемых канальных ресурсов для каждого AR/VR-потока позволяет увеличить количество одновременно обслуживаемых потоков, иными словами, повысить емкость сети.

В литературе функция множественного подключения практически не рассматривается как способ повышения качества обслуживания AR/VR-трафика. В основном рассматривается либо функция двойного подключения, либо иные типы обслуживаемого трафика (см. подробнее раздел 3). Помимо этого, предложенные в литературе алгоритмы балансировки трафика, как правило, разработаны для случая обслуживания широкополосного трафика, и оказываются неприменимы к AR/VR-трафику со строгими требованиями к качеству обслуживания.

В данной работе исследуется влияние способа подключения пользователя к нескольким базовым станциям и выбора алгоритма балансировки трафика между станциями на качество обслуживания AR/VR-трафика и потребление ресурсов беспроводных каналов. Способы подключения к базо-

вым станциям и алгоритмы балансировки трафика сравниваются по таким показателям, как доля потерянных видеокадров и доля используемых ресурсов низкочастотного и миллиметровых каналов.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 описан объект исследования, а именно, способы подключения к нескольким базовым станциям и алгоритмы балансировки трафика, а также приводится постановка задачи. В разделе 3 приведен обзор литературы по теме исследования. В разделе 4 определены сценарии для сравнительного анализа способов подключения пользователя к базовым станциям и алгоритмов балансировки трафика и приводится анализ численных результатов. В разделе 5 резюмируются основные результаты работы.

2 Объект исследования и постановка задачи

2.1 Способы подключения к базовым станциям

В данной работе исследуются два способа подключения пользователя к базовым станциям сетей 5G: двойное подключение и множественное подключение.

Двойное подключение Двойное подключение (англ.: Dual Connectivity, DC) позволяет подключить пользовательское устройство к двум базовым станциям одновременно. Соответствующая функциональность сетей 5G в спецификациях 3GPP получило название Multi-Radio Dual Connectivity [6].

В случае двойного подключения, одна из базовых станций является основной (англ.: master) и отвечает за управление соединениями пользовательского устройства с базовыми станциями, а также выбор вспомогательной (англ.: secondary) базовой станции и выполнение процедуры смены вспомогательной базовой станции. Как правило, основной является базовая станция, обеспечивающая наибольшую надежность доставки данных, чтобы успешно обмениваться служебной информацией с пользовательским устройством, например, информацией о конфигурации протокола Radio Resource Control (RRC). В стандартах, описывающих функциональность двойного подключения, предлагается выбирать вспомогательную станцию с максимальной оценкой отношения сигнал-шум (англ.: Signal-to-Interference-and-Noise Ratio, SINR). Однако в литературе [8, 9] в качестве метрики выбора также используется оценка пропускной способности с применением формулы Шеннона-Хартли.

В спецификациях 3GPP основную станцию называют MgNB (Master gNB), а вспомогательную — SgNB (Secondary gNB). Как правило, основная базовая станция работает в низкочастотном диапазоне, а вспомогательная — в миллиметровом диапазоне частот. Это позволяет достичь высоких пропускных способностей за счет использования миллиметрового беспроводного канала и обеспечить высокую надежность передачи с помощью низкочастотного канала.

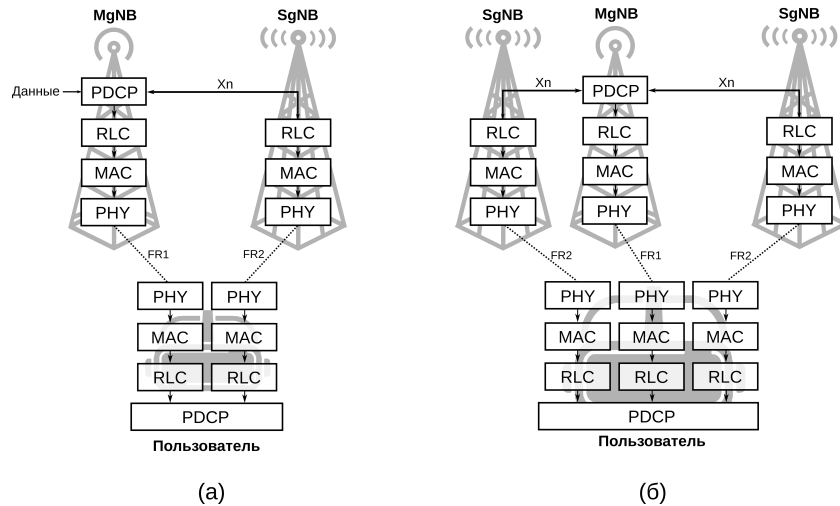


Рис. 1: Архитектура сети 5G с (а) двойным подключением; (б) множественным подключением с изображением стека протоколов базовых станций и пользовательских устройств.

Для осуществления двойного подключения стеки протоколов двух базовых станций объединяются на уровне Packet Data Convergence Protocol (PDCP), как показано на рис. 1(а). Объединение стеков позволяет контролировать отправку данных между двумя каналами на уровне PDCP. На пользовательском устройстве необходимо обеспечить два различных радиointерфейса для соединения с соответствующими базовыми станциями, а также реализовать два отдельных стека протоколов. Также на пользовательском протоколе PDCP следует включить функции перестановки пакетов и отбрасывания дубликатов, чтобы пакеты были доставлены на прикладной уровень в нужном порядке и без повторений.

Множественное подключение Подключение более чем к двум базовым станциям (англ.: Multi-Connectivity, MC) является обобщением двойного подключения на случай нескольких вспомогательных базовых станций, с каждой из которых пользователь устанавливает соединение (см. рис. 1(б)).

Множественное подключение не введено в спецификациях 3GPP, однако рассматривается в литературе. В работе [7] рассматриваются различные архитектуры подключения к нескольким миллиметровым базовым станциям, а именно точки объединения стека протоколов и использование таких функциональностей из стандартов 3GPP, как Multiple Transmit/Receive Point (Multi-TRP) или Dual Active Protocol Stack (DAPS). Авторы формулируют ряд открытых вопросов, среди которых можно назвать проблему перестановки пакетов с условием обеспечения низкой задержки, выбор метода

разбиения данных между каналами, контроль подключения устройства к базовым станциям и т.д. В работе [10] исследуется возможность повышения качества обслуживания URLLC-трафика за счет подключения пользовательского устройства к нескольким вспомогательным базовым станциям. Под термином Multi-Connectivity авторы понимают передачу данных в общем смысле между двумя узлами через несколько каналов с различными характеристиками, с точками объединения каналов от уровня приложения до физического уровня. Авторы также затрагивают вопрос распределения данных между каналами и предлагают ряд алгоритмов балансировки трафика между каналами.

В связи с тем, что архитектура сетей 5G, поддерживающих множественное подключение, не описана в спецификациях, вопрос имплементации данной функциональности в реальных устройствах остается открытым. В данной работе мы рассматриваем имплементацию, изображенную на рис. 1(б) и использующую в качестве общего для всех базовых станций протокол PDCP.

2.2 Алгоритмы балансировки трафика

В данном разделе рассмотрены основные алгоритмы балансировки трафика между базовыми станциями и проанализированы их преимущества и недостатки.

Переключение каналов В алгоритме с переключением каналов (англ.: Link Switching) данные передаются по одному каналу, выбранному основной базовой станцией MgNB.

Основным примером алгоритма переключения каналов является процедура хэндовера (англ.: handover), описанная в стандартах сетей 5G [11]. Для начала выбирается метрика, по которой оценивается качество беспроводных каналов соответствующих базовых станций. Распространенным примером метрики является соотношение сигнал-шум обслуживающей базовой станции, усредненное по всему каналу (англ.: SINR wideband). Активная базовая станция, установившая соединение с пользовательским устройством, с определенным периодом принимает решение о хэндовере на основе измерений качества беспроводных каналов. Если качество канала одной из соседних базовых станций превосходит качество канала активной базовой станции по выбранной метрике, активная станция осуществляет процедуру смены обслуживающей базовой станции. Процедура хэндовера включает процедуру случайного доступа для синхронизации и подключения пользовательского устройства к новой активной базовой станции, перенос буферизованных данных с исходной базовой станции на новую станцию и перенастройку конфигурации протокола Radio Resource Control (RRC) на базовых станциях и пользовательском устройстве. Отметим, что длительность проведения процедуры хэндовера может достигать нескольких десятков миллисекунд, в течение которых отправка данных базовыми станциями не осуществляется, что негативно влияет на качество обслуживания трафика со строгими требованиями к задержке и надежности доставки данных.

В рамках данной работы в качестве метрики для выбора обслуживающей базовой станции используются оценки пропускных способностей беспроводных каналов соответствующих базовых станций [8,9]. Рассматриваются следующие два способа переключения между обслуживающими миллиметровыми базовыми станциями.

- Хэндовер (медленное переключение): смена активной миллиметровой базовой станции осуществляется с помощью процедуры хэндовера;
- Программное (быстрое переключение): пользовательское устройство подключено одновременно к нескольким базовым станциям с помощью функции множественного подключения, а базовая станция, через которую будет осуществляться передача данных, выбирается динамически основной базовой станции на уровне PDCP.

С одной стороны, использование быстрого переключения по сравнению с хэндовером позволит повысить надежность передачи данных при обслуживании AR/VR-трафика. С другой стороны, хэндовер позволяет обеспечить меньшее энергопотребление пользовательского устройства и базовых станций по сравнению с быстрым переключением за счет меньшего количества активных соединений, установленных между пользовательским устройством и базовой станцией.

Переключение каналов позволяет динамически управлять использованием канальных ресурсов при обслуживании пользователей. Недостатком данного подхода по сравнению с другими алгоритмами балансировки трафика являются возможные потери данных при переключении на канал с резко снизившимся соотношением сигнал-шум, что особенно актуально для использования процедуры хэндовера при смене обслуживающей миллиметровой базовой станции.

Дублирование данных Алгоритм дублирования данных (англ.: Packet Duplication), введенный в спецификации [11], заключается в одновременной передаче данных по всем доступным беспроводным каналам. Основная станция MgNB создает копию каждого пакета, чтобы направить по одному экземпляру этого пакета для передачи через каждый из беспроводных каналов. Для отбрасывания дубликатов и перестановки пакетов на пользовательском устройстве применяются соответствующие функции протокола PDCP.

Преимущество данного алгоритма заключается в повышенной надежности передачи, ведь для передачи данных используются все доступные канальные ресурсы. Существенный недостаток этого алгоритма — высокое потребление канальных ресурсов, что снижает объем ресурсов, доступных для обслуживания других пользователей.

Алгоритм Delay-Based Traffic Balancing В статье [12] авторами данной работы был предложен алгоритм балансировки трафика Delay-Based Traffic

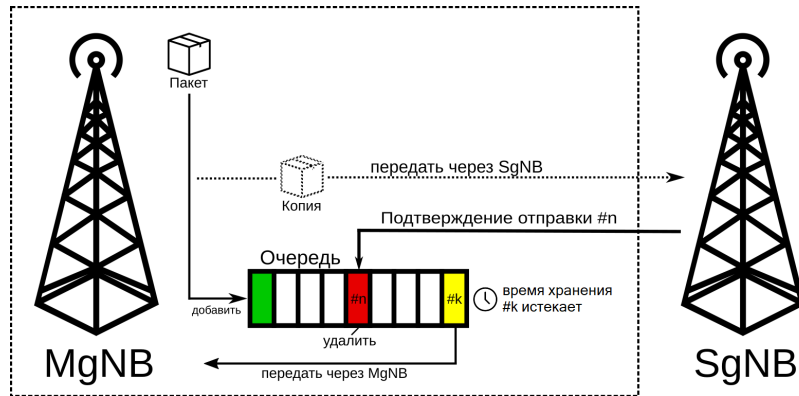


Рис. 2: Схема, описывающая работу алгоритма балансировки трафика DBTB.

Balancing (DBTB). Данный алгоритм использует функцию двойного подключения (а именно, реализован в качестве функции протокола PDCP) и нацелен на выполнение строгих требований к качеству обслуживания AR/VR-трафика.

Принцип его работы проиллюстрирован на рис. 2. Данные, приходящие на основную базовую станцию MgNB, копируются и направляются на передачу через вспомогательную базовую станцию SgNB. Исходные данные сохраняются в специальной очереди, создаваемой для каждого потока данных, на основной базовой станции. Для каждого пакета в очереди определяется максимальное время его хранения, которое зависит от ограничения по задержке, оценки пропускной способности низкочастотного канала и длины очереди. Значение времени хранения выбирается таким образом, чтобы при отправке пакета через низкочастотный канал он был доставлен до пользователя с выполнением ограничения по задержке. При успешной передаче пакета миллиметровая базовая станция направляет основной базовой станции подтверждение. При получении подтверждения основная базовая станция удаляет соответствующий пакет из очереди. Если время хранения пакета истекает, а подтверждение передачи его копии с помощью миллиметровой базовой станции не пришло на основную станцию, пакет извлекается из очереди и отправляется по низкочастотному каналу.

В [12] показано, что описанный алгоритм позволяет передавать данные с выполнением ограничения по задержке и низким коэффициентом использования низкочастотного канала.

2.3 Постановка задачи

Целью данной работы является исследование влияния способа подключения пользователя к базовым станциям и используемого алгоритма балансировки

трафика между базовыми станциями на выполнение требований к качеству обслуживания AR/VR-трафика и потребление канальных ресурсов.

В данной работе требования к качеству обслуживания трафика AR/VR формулируются следующим образом:

- задержка пакетов не должна превышать 16 мс (для частоты кадров 60 кадров/с);
- доля потерянных видеокадров (т.е. недоставленных за 16 мс) не должна превышать 1%.

Отметим, что видеокадр считается потерянным при задержке хотя бы одного из пакетов видеокадра, превышающей требования к задержке при обслуживании трафика AR/VR.

При исследовании способов подключения к станциям и алгоритмов балансировки трафика также оценивается доля используемых канальных ресурсов: низкочастотных и миллиметровых каналов.

3 Обзор литературы

Двойное подключение широко рассматривается в литературе как способ повышения качества обслуживания AR/VR-трафика [5, 12–14]. Однако работ, исследующих множественное подключение для обслуживания AR/VR-трафика, значительно меньше. В [15] показано, что использование множественного подключения позволяет снизить задержку и повысить надежность передачи при обслуживании AR/VR-трафика. Однако в работе не исследовался вопрос использования канальных ресурсов. В [16] предлагаются новые алгоритмы выбора сигнально-кодовых конструкций (СКК) и планирования ресурсов для повышения качества обслуживания трафика сверхнадежной связи с малой задержкой (англ. Ultra-Reliable Low Latency Communication, URLLC) при использовании множественного подключения. Результаты моделирования показали снижение доли используемых канальных ресурсов на 40% при выполнении требований к качеству обслуживания. Однако стоит отметить, что URLLC-трафик представляет собой передачу сообщений малого размера (несколько сотен байт), что существенно отличает этот тип трафика от AR/VR-трафика, где видеокадры достигают размеров в несколько сотен килобайт. В [17] сравниваются решения с двойным и тройным подключением пользователя к базовым станциям по показателям пропускной способности и энергопотребления. Авторы работы рассматривают модель насыщенного широкополосного трафика и не рассматривают показатели задержки и доли потерянных пакетов, важных для AR/VR-трафика. Работы [7, 10] содержат обзор вариантов архитектуры построения функции множественного подключения. Однако подробный анализ производительности рассматриваемых архитектур не приводится.

В литературе предложено и исследовано множество алгоритмов балансировки трафика между беспроводными каналами с различными характеристиками, однако лишь некоторые из них рассматривают случай обслужи-

вания AR/VR-трафика. В [12] исследуются различные алгоритмы балансировки трафика при обслуживании AR/VR-трафика. Предложен алгоритм Delay-Based Traffic Balancing (DBTB), обеспечивающий увеличение емкости сети¹ более чем в 2 раза при низком потреблении ресурсов низкочастотного канала. Однако данные результаты были получены только для случая двойного подключения пользователя к базовым станциям. В [8] предложены несколько алгоритмов выбора активных вспомогательных базовых станций, и приведен их сравнительный анализ по таким показателям, как вероятность разрыва соединения, пропускная способность и энергопотребление устройств при обслуживании широкополосного трафика. В [18] подробно рассмотрена реализация алгоритма дублирования данных для обслуживания широкополосного трафика (см. раздел 2.2) в сетях 5G с двойным подключением пользовательского устройства. В [19] предлагается алгоритм разбиения передаваемых данных между зонами покрытия базовых станций пропорционально количеству переключений между станциями и скоростью движения пользователей. Однако, как показано в работе [12], разбиение данных при обслуживании AR/VR-трафика не обеспечивает выполнение строгих требований к надежности доставки данных.

Таким образом, проведенный обзор показывает, что в литературе отсутствуют работы по анализу влияния различных способов подключения пользователя (в том числе двойного и множественного подключения) и различных алгоритмов балансировки трафика на качество обслуживания AR/VR-трафика в сотовых сетях, использующих низкочастотный и миллиметровый частотные диапазоны.

4 Численные результаты

4.1 Постановка экспериментов

Для исследования способов подключения пользователя к базовым станциям и алгоритмов балансировки трафика используется среда имитационного моделирования NS-3 [21]. Основные параметры эксперимента приведены в таблице 1.

Рассматривается сеть 5G, состоящая из трех базовых станций: одна работает в низкочастотном диапазоне (на несущей частоте 3,6 ГГц), две другие работают в миллиметровом диапазоне частот (несущая частота – 24 и 25 ГГц соответственно). Низкочастотная базовая станция и 1-я миллиметровая базовая станция расположены в одной точке, 2-я миллиметровая базовая станция расположена на расстояниях 300 или 450 метров от других станций. Как показано в [22], типичное расстояние между центрами сот (англ.: Inter-Site Distance, ISD) для низкочастотных базовых станций в сценарии Dense

¹ Емкость сети — это количество пользователей, для которого отношение количества удовлетворенных пользователей к общему числу пользователей выше 90%. Удовлетворенный пользователь — это пользователь, для которого доля потерянных видеок кадров не превышает 99%. [1]

Таблица 1: Основные параметры имитационной модели.

Параметр	Значение
Модель распространения сигнала	3GPP Dense Urban [20]
Ширина полосы низкочастотного канала	100 МГц
Несущая частота низкочастотного канала	3,6 ГГц
Ширина полосы миллиметровых каналов	1 ГГц
Несущая частота 1-го миллиметрового канала	24 ГГц
Несущая частота 2-го миллиметрового канала	25 ГГц
Мощность базовых станций	30 дБм
Высота базовых станций	30 м
Высота пользовательского устройства	1,5 м
Средний битрейт видеопотока	50 Мбит/с
Частота кадров видеопотока	60 кадр/с
Максимальная задержка видеокадра	16 мс
Длительность эксперимента	100 с
Количество независимых прогонов	30

Urban [20] составляет 300–450 м. Таким образом, в данной работе предполагается, что максимальное расстояние до ближайшей низкочастотной базовой станции не превышает 450 м.

Рассматривается одно неподвижное пользовательское устройство, находящееся на линии между миллиметровыми базовыми станциями. С удаленного сервера осуществляется передача AR/VR-потока на пользователя в течение 100 секунд. Размер каждого видеокадра является случайной величиной, которая определяется видеокодеком H.265. Отношение пикового размера видеокадра к среднему не превышает двух.

Сравниваются следующие способы подключения пользовательского устройства к базовым станциям и отправки данных базовыми станциями:

- Медленное переключение: пользовательское устройство подключается по принципу двойного подключения к низкочастотной и одной миллиметровой базовым станциям, переключение активной миллиметровой станции осуществляется через процедуру хэндовера на основе сравнения оценки пропускной способности миллиметровых каналов;
- Быстрое переключение: пользовательское устройство подключается по принципу множественного подключения к низкочастотной и обоим миллиметровым базовым станциям, выбор активной миллиметровой базовой станции осуществляется на протоколе PDCP низкочастотной базовой станции;
- Дублирование данных (по миллиметровым каналам): пользовательское устройство подключается по принципу множественного подключения ко всем базовым станциям, данные дублируются и передаются по всем миллиметровым каналам.

Исследуются следующие алгоритмы балансировки трафика:

- Станции SgNB: отправка данных только с использованием миллиметровых каналов;
- Delay-Based Traffic Balancing (DBTB): отправка данных по низкочастотному каналу в случае неуспешной передачи через миллиметровый(е) канал(ы);

Отдельно рассматривается решение «Дублирование по всем каналам», представляющее собой отставку данных по всем доступным беспроводным каналам при использовании функции множественного подключения.

Рассматриваемые решения сравниваются по следующим показателям:

- Доля потерянных видеокадров. Видеокадр считается потерянным, если хотя бы один пакет, относящийся к видеокадру, не был доставлен до пользовательского устройства за заданное время;
- Доля потребляемых низкочастотных ресурсов, т.е. доля ресурсных блоков, используемых для нисходящей передачи на низкочастотной базовой станции;
- Доля потребляемых миллиметровых ресурсов, т.е. доля ресурсных блоков, используемых для нисходящей передачи, на каждой из миллиметровых базовых станций. Также вводится показатель суммарной доли потребляемых миллиметровых ресурсов, представляющий собой сумму долей потребляемых ресурсов для двух миллиметровых базовых станций.

Требования к качеству обслуживания AR/VR-трафика приведены в разделе 2.3.

4.2 Анализ результатов

Расстояние между миллиметровыми станциями 300 м. На рис. 3(а) изображен график доли потерянных видеокадров. Рост потерь видеокадров на расстояниях, близких к 150 м, вызван падением мощности принимаемого сигнала и колебаниями емкости миллиметровых каналов при отдалении от обеих миллиметровых станций. Для решения «Станции SgNB (медленное переключение)» доля потерянных видеокадров достигает 2%, т.е. требование к надежности и задержке не выполняется. Это вызвано тем, что переключение на другой миллиметровый канал занимает длительное время (порядка десятков миллисекунд), в течение которого пользовательское устройство не принимает данные и теряет видеокадры. Однако использование множественного подключения с решением «Станции SgNB (быстрое переключение)» позволяет достаточно быстро переключиться на канал с более высоким соотношением сигнал-шум и пропускной способностью. Решение «Станции SgNB (дублирование)» демонстрирует еще большее снижение доли потерянных видеокадров, поскольку такая передача обеспечивает непрерывную отставку данных по всем миллиметровым каналам. Таким образом, решения, использующие функцию множественного подключения, позволяют выполнить требование к надежности передачи данных

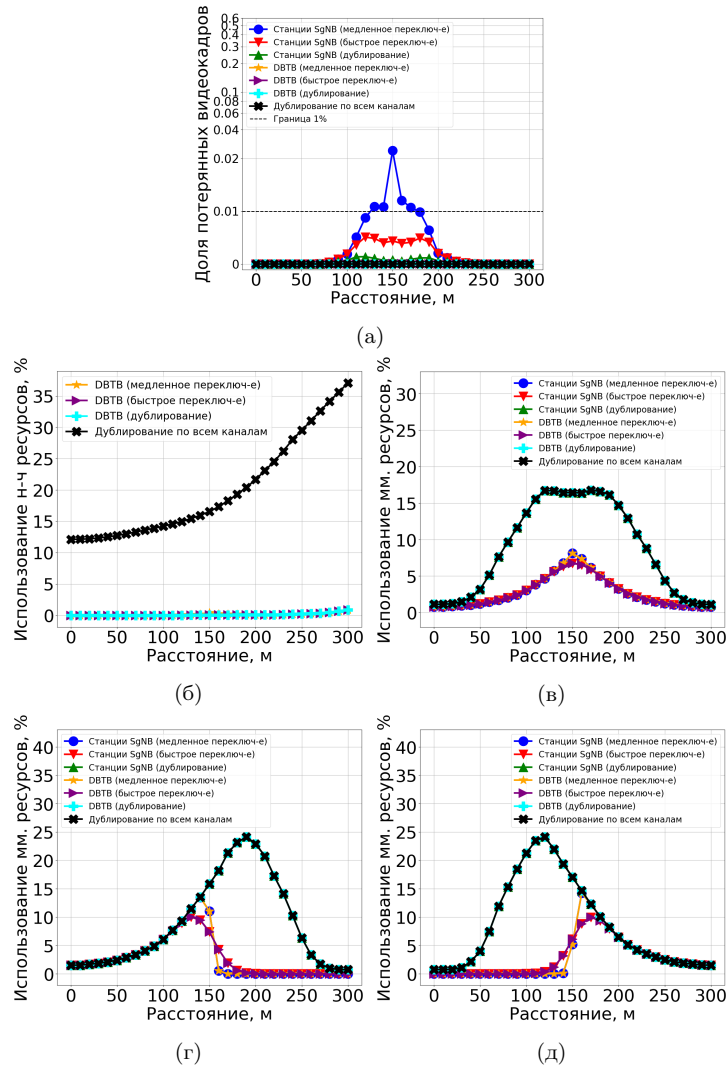


Рис. 3: Графики зависимости (а) доли потерянных видеокадров, (б) доли используемых низкочастотных ресурсов, (в) суммарная доля используемых миллиметровых ресурсов, (г) (д) доля используемых миллиметровых ресурсов для 1-й и 2-й миллиметровой станций соответственно, от расстояния между пользовательским устройством и низкочастотной базовой станцией (сценарий 300 м).

для AR/VR-трафика. Все решения, использующие алгоритм балансировки трафика DVB, и «Дублирование по всем каналам» также выполняют требование к надежности, обеспечивая близкие к нулю потери кадров.

На рис. 3(б) представлен график доли используемых низкочастотных ресурсов. Рост потребления низкочастотных ресурсов для решения «Дублирование по всем каналам» при отдалении пользовательского устройства от низкочастотной базовой станции объясняется ухудшением качества низкочастотного канала. Для данного решения доля потребляемых низкочастотных ресурсов достигает 35%. Решения, использующие алгоритм балансировки трафика DVB, показывают очень низкое использование ресурсов низкочастотного канала, потому что передача через низкочастотную базовую станцию осуществляется только в случае, когда данные не доставлены по миллиметровым каналам. Отметим, что решения «Станции SgNB» не используют ресурсы низкочастотного канала.

Далее рассмотрим графики использования ресурсов миллиметровых каналов. На рис. 3(г) представлен график доли используемых ресурсов миллиметрового канала 1-й миллиметровой станции. При малом расстоянии до базовой станции (до 50 м) используется малая доля ресурсов миллиметрового канала, поскольку емкость миллиметрового канала шириной 1 ГГц составляет несколько Гбит/с. При передаче пульсирующего трафика со средним битрейтом 50 Мбит/с используется до 2% доступных ресурсов. При отдалении от базовой станции использование ресурсов растет из-за ухудшения качества канала и повышения количества повторных передач. Для решений из группы «Дублирование», при дальнейшем отдалении от 1-й миллиметровой базовой станции (более 200 м) использование ресурсов снижается, потому что из-за низкого качества канала базовая станция не может осуществлять передачу данных даже на самой робастной СКК. Использование ресурсов решениями из группы «Медленное переключение» падает начиная с расстояния 150 м вследствие переключений на 2-ю миллиметровую базовую станцию. Для решений из группы «Быстрое переключение» снижение потребления ресурсов происходит на более низких расстояниях из-за более частого переключения на 2-ю миллиметровую станцию. При этом снижение потребления ресурсов происходит плавнее, поскольку при преодолении расстояния 150 м переключений на 1-ю миллиметровую станцию осуществляется больше, чем для решений «Медленное переключение». На рис. 3(д) приведен график доли используемых ресурсов миллиметрового канала 2-й миллиметровой станции. Заметим, что кривые на данном графике схожи с таковыми для графика для 1-й миллиметровой станции с точностью до симметрии относительно расстояния 150 м, поэтому рассуждения для 2-й миллиметровой станции аналогичны. На рис. 3(в) представлен график суммарной доли потребляемых ресурсов обоих миллиметровых каналов. Видим, что использование решений «Дублирование» приводит к наибольшему потреблению ресурсов, тогда как решения из групп «Медленное переключение» и «Быстрое переключение» позволяют снизить долю используемых ресурсов до двух раз.

Результаты показывают, что лучшим решением для рассматриваемого сценария является «Станции SgNB (быстрое переключение)», поскольку оно позволяет выполнить требования к качеству обслуживания AR/VR-трафика, не используя низкочастотный канал для передачи данных и использует наименьший объем ресурсов миллиметровых каналов. Отметим, что все решения, использующие алгоритм балансировки трафика DBTV, также позволяют выполнить вышеупомянутые требования к качеству обслуживания при малом использовании низкочастотных ресурсов, а использование «DBTV (быстрое переключение)» обеспечивает заметное снижение использования миллиметровых ресурсов по сравнению с решениями, основанными на дублировании данных.

Расстояние между миллиметровыми станциями 450 м. На рис. 4(а) представлен график доли потерянных видеокадров. Видно, что решения из группы «Станции SgNB» не выполняют требования к качеству обслуживания AR/VR-трафика. Решение «DBTV (медленное переключение)», основанное на двойном подключении, показывает потери кадров больше 1% для расстояний 230–250 м., из-за чего требование к надежности доставки AR/VR-трафика не выполняется. В свою очередь решения «DBTV (быстрое переключение)» и «DBTV (дублирование)» снижают потери видеокадров до значений, не превышающих 1%. Решение «Дублирование по всем каналам» также позволяет выполнить требование к надежности передачи.

На рис. 4(б) приведен график доли используемых низкочастотных ресурсов. Заметим, что потребление ресурсов низкочастотного канала решениями из группы «DBTV» заметно возросло для расстояний, близких к 225 м (середины отрезка между миллиметровыми базовыми станциями), поскольку качество обоих миллиметровых каналов существенно снизилось, и алгоритм DBTV чаще отправляет данные через низкочастотную базовую станцию. По сравнению с решением «Дублирование по всем каналам», решения «DBTV» позволяют значительно снизить долю используемых низкочастотных ресурсов.

На рис. 4(г) представлен график использования миллиметровых канальных ресурсов 1-й миллиметровой базовой станции. Также как и для предыдущего сценария, потребление миллиметровых ресурсов растет до расстояния около 200 м и затем снижается из-за низкого качества канала и переключения на 2-ю миллиметровую базовую станцию. На рис. 4(в) представлен график суммарной доли используемых миллиметровых ресурсов. Заметим, что решения «Быстрое переключение» снижают потребление миллиметровых канальных ресурсов до 25% по сравнению с решениями из группы «Дублирование» для расстояния 225 м. Хотя решения группы «Медленное переключение» показывают еще большее снижение использования миллиметровых канальных ресурсов на расстояниях, близких к 225 м, недоиспользование миллиметровых каналов приводит к невыполнению требований к качеству обслуживания AR/VR-трафика, как показано на рис. 4(а).

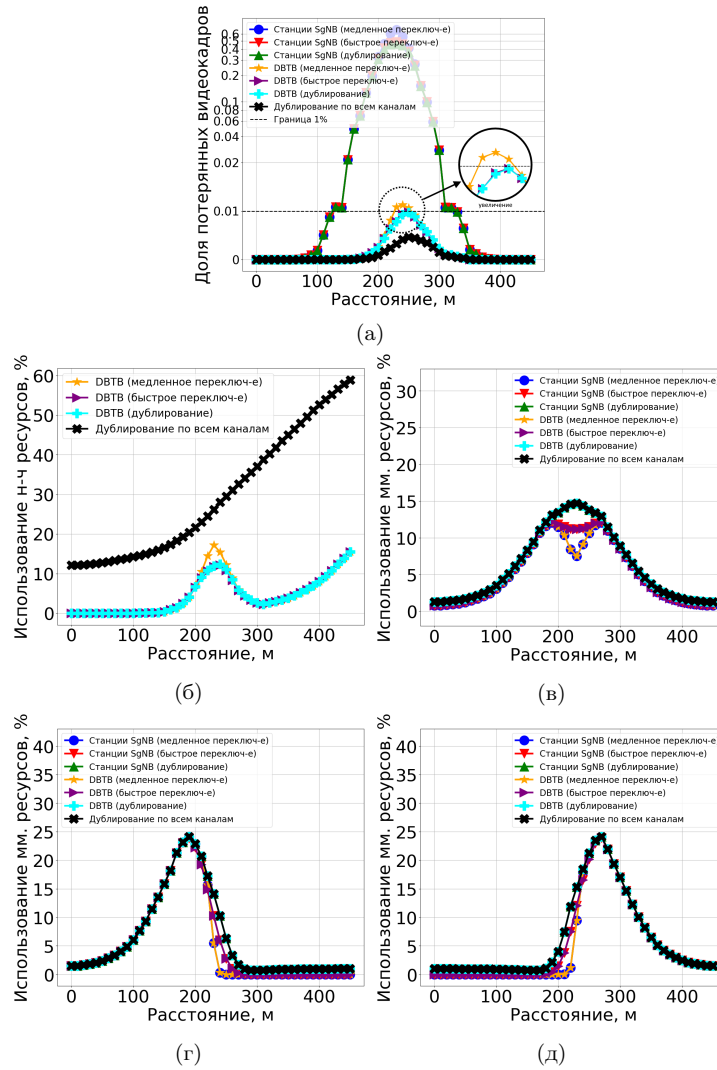


Рис. 4: Графики зависимости (а) доли потерянных видеокадров, (б) доли используемых низкочастотных ресурсов, (в) суммарная доля используемых миллиметровых ресурсов, (г) (д) доля используемых миллиметровых ресурсов для 1-й и 2-й миллиметровой станций соответственно, от расстояния между пользовательским устройством и низкочастотной базовой станцией (сценарий 450 м).

Из результатов для данного сценария можно сделать вывод, что решение «DBTV (быстрое переключение)», использующее функцию множественного подключения, позволяет выполнить требования к качеству обслуживания AR/VR-трафика, обеспечить низкое потребление низкочастотных ресурсов, а также снижение использования ресурсов миллиметровых каналов до 25% по сравнению с решениями, основанными на дублировании данных.

5 Заключение

В данной работе было исследовано влияние способа подключения пользовательского устройства к базовым станциям сетей 5G и выбора алгоритма балансировки трафика между станциями на качество обслуживания трафика дополненной и виртуальной реальности (англ.: Augmented and Virtual Reality, AR/VR). Была рассмотрена возможность подключения пользовательского устройства к низкочастотной и нескольким миллиметровым базовым станциям с помощью функции множественного подключения и проанализированы различные алгоритмы балансировки трафика, предложенные в литературе.

Результаты имитационного моделирования показывают, что множественное подключение и алгоритм балансировки трафика DBTV позволяют выполнить требования к качеству обслуживания AR/VR-трафика и при этом обеспечить низкое потребление ресурсов как низкочастотного канала, так и миллиметровых каналов, что, в свою очередь, позволит обеспечить большую емкость сети по сравнению с другими решениями.

В будущих работах планируется расширить рассматриваемый сценарий на случай большего количества базовых станций и пользователей, а также на случай наличия в сети других типов трафика.

Список литературы

1. Study on XR (Extended Reality) Evaluations for NR : Technical Report (TR) : 38.838 / 3rd Generation Partnership Project (3GPP) : 2021. — 12. — Version 17.0.0.
2. Huawei iLab. Cloud VR Network Solution White Paper, Huawei Technologies Co. — 2018.
3. S. Sun G. R. MacCartney Jr. T. S. Rappaport. Millimeter-Wave Distance-Dependent Large-Scale Propagation Measurements and Path Loss Models for Outdoor and Indoor 5G Systems // 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2016). — 2016.
4. S. Sun G. R. MacCartney Jr. T. S. Rappaport. A Survey on Obstacles for 5G Communication. — 2015.
5. Multi-Connectivity using NR-DC for High Throughput and Ultra-reliable Low Latency Communication in 5G Networks / Prabodh Mishra, Snigdhaswin Kar, Vikas Bollapragada, Kuang-Ching Wang // 2021 IEEE 4th 5G World Forum. — 2021. — P. 36–40.
6. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and NR; Multi-connectivity; Stage 2 : Technical Specification (TS) : 37.340 / 3rd Generation Partnership Project (3GPP) : 2022. — 06. — Version 17.1.0.

7. Multi-Connectivity in Mobile Networks: Challenges and Benefits / Carlos Pupiales, Daniela Laselva, Quentin De Coninck et al. // *IEEE Communications Magazine*. — 2021. — Vol. 59, no. 11. — P. 116–122.
8. Energy efficient multi-connectivity algorithms for ultra-dense 5G networks / V. Poirot, M. Ericson, M. Nordberg, K. Andersson // *Wireless Networks*. — 2020. — Vol. 26.
9. W. K. Lai C. Shieh F. Chou C. Hsu. Handover Management for D2D Communication in 5G Networks // 2020 2nd International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI). — 2020. — P. 64–69.
10. Multi-Connectivity as an Enabler for Reliable Low Latency Communications—An Overview / Marie-Theres Suer, Christoph Thein, Hugues Tchouankem, Lars Wolf // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2020. — Vol. 22, no. 1. — P. 156–169.
11. NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2 : Technical Specification (TS) : 38.300 / 3rd Generation Partnership Project (3GPP) : 2022. — 06. — Version 17.1.0.
12. Maxim Susloparov, Artem Krasilov, Evgeny Khorov. Providing High Capacity for AR/VR Traffic in 5G Systems With Multi-Connectivity // 2022 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). — 2022. — P. 385–390.
13. Cellular-Connected Wireless Virtual Reality: Requirements, Challenges, and Solutions / Fenghe Hu, Yansha Deng, Walid Saad et al. // *IEEE Communications Magazine*. — 2020. — Vol. 58, no. 5. — P. 105–111.
14. Reliability Enhancement for VR Delivery in Mobile-Edge Empowered Dual-Connectivity Sub-6 GHz and mmWave HetNets / Zhuojia Gu, Hancheng Lu, Peilin Hong, Yongdong Zhang // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. — 2022. — Vol. 21, no. 4. — P. 2210–2226.
15. Toward Low-Latency and Ultra-Reliable Virtual Reality / Mohammed S. Elbamby, Cristina Perfecto, Mehdi Bennis, Klaus Doppler // *IEEE Network*. — 2018. — Vol. 32, no. 2. — P. 78–84.
16. Khan Jihaz, Jacob Lillykutty. Link Adaptation for Multi-connectivity Enabled 5G URLLC: Challenges and Solutions // 2021 International Conference on COMmunication Systems & NETworks (COMSNETS). — 2021. — P. 148–152.
17. User Performance in a 5G Multi-connectivity Ultra-Dense Network City Scenario / Jose Perdomo, Marten Ericsson, Mats Nordberg, Karl Andersson // 2020 IEEE 45th Conference on Local Computer Networks (LCN). — 2020. — P. 195–203.
18. Aijaz Adnan. Packet Duplication in Dual Connectivity Enabled 5G Wireless Networks: Overview and Challenges // *IEEE Communications Standards Magazine*. — 2019. — Vol. 3, no. 3. — P. 20–28.
19. Dual Connectivity-Based Mobility Management and Data Split Mechanism in 4G/5G Cellular Networks / Tariq Mumtaz, Shahabuddin Muhammad, Muhammad Aslam, Nazeeruddin Mohammad // *IEEE Access*. — 2020. — 05. — Vol. PP. — P. 1.
20. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz : Technical Report (TR) : 38.901 / 3rd Generation Partnership Project (3GPP) : 2022. — 03. — Version 17.0.0.
21. Network Simulator 3. — Access mode: <https://www.nsnam.org/>.
22. 5G Millimeter Wave Frequencies and Mobile Networks : A Technology Whitepaper on Key Features and Challenges / The International Wireless Industry Consortium (IWPC) : 2019. — 06. — Version 1.

Исследование метода снижения размерности задачи настройки реконфигурируемой интеллектуальной поверхности*

Илья Буртаков^{1,2}, Алексей Куреев^{2,3}

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

³ Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики

Аннотация Одним из возможных способов увеличения области покрытия и пропускной способности беспроводных сетей связи является использование реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (англ.: Reconfigurable Intelligent Surface, RIS). RIS представляет собой двумерную поверхность, состоящую из элементов, обеспечивающих программно контролируемое изменение амплитуды и сдвиг по фазе отраженной от них электромагнитной волны. Из литературы известны алгоритмы настройки RIS, обеспечивающие точную настройку, при которой достигается верхняя граница пропускной способности системы с RIS. Однако, такие алгоритмы имеют большую вычислительную сложность, что не позволяет использовать их на реальном оборудовании. В данной работе рассматривается метод снижения вычислительной сложности алгоритма настройки RIS, позволяющий уменьшить время настройки без значительных потерь в достигаемой пропускной способности.

Ключевые слова: реконфигурируемые интеллектуальные поверхности, 5G, MIMO, снижение размерности

1 Введение

Возможным способом повышения производительности существующих беспроводных сетей Wi-Fi, 5G и будущих сотовых сетей шестого поколения, является управление программным обеспечением не только приемо-передающих устройств, входящих в инфраструктуру беспроводной системы связи, но и управление характеристиками передаваемого сигнала в окружающем пространстве при помощи промежуточных устройств связи.

* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

На основании вышеизложенного, исследователями предлагается использовать интеллектуальные отражающие поверхности или реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (англ.: Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) в качестве многообещающей новой технологии для повышения производительности беспроводных сетей [1].

RIS представляет собой двумерную поверхность, состоящую из большого количества отражающих элементов, которые настраиваются программным способом для взаимодействия с электромагнитными волнами [2]. При помощи функционала изменения фазы и амплитуды волны, падающей на элементы RIS, ей можно придать такие характеристики ретрансляции сигнала, при которых электромагнитные волны будут взаимодействовать с ней, как с поверхностью заданной формы; например, RIS может выполнять функции металлической пластины, которая способна поворачиваться и изгибаться для фокусировки падающих волн в нужном месте пространства [3].

Развертывание RIS в существующих системах связи (например в системах сотовой связи и Wi-Fi) не требует значительных изменений в стандартах систем связи и, что более важно, не требует внесения изменений в работу пользовательских устройств. В результате интеграция RIS в беспроводные сети может быть сделана без затруднений для пользователей, что обеспечивает высокую гибкость и превосходную совместимость с существующими беспроводными системами.

Одним из примеров использования RIS является расширение зоны покрытия систем, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн, поскольку они критически уязвимы для блокировки препятствиями. В этом случае развертывание RIS, имеющей надежную связь с базовой станцией и пользователем, помогает обойти препятствие за счет интеллектуального отражения сигнала и, таким образом, создает между ними виртуальную линию прямой видимости.

Неотъемлемой частью RIS, является алгоритм настройки, поскольку для достижения требуемого функционала системы необходимо определенным образом выбрать распределение мощностей на антеннах Tx и фазу элементов RIS. При помощи алгоритма настройки можно оптимизировать такие целевые функции как пропускную способность [4], [5] или энергоэффективность всей системы [6].

Из литературы известно множество алгоритмов настройки RIS, которые созданы для различных систем и при различных ограничениях. Авторы работы [6] рассматривают нисходящий канал сотовой сети, в которой базовая станция с несколькими антеннами достигает мобильных пользователей с одной антенной через канал, снабженный RIS. В работе [7] предложен метод получения канальной информации в MIMO (англ.: Multiple Input Multiple Output) системе, а также алгоритм настройки RIS, основанный на получаемой CSI (англ.: Channel State Information). Алгоритм, предложенный в работе [4] имеет очень низкую сложность реализации и вычислительную сложность, однако предполагает отсутствие прямого канала между приемником и передатчиком т.е. учитывает только канал, проходящий через RIS.

В работе [5] описан алгоритм настройки RIS для MIMO системы, производящий также оптимизацию распределения мощности на антеннах передатчика для увеличения SNR (англ.: Signal to Noise Ratio) на приемнике, однако этот алгоритм имеет большую вычислительную сложность.

Несмотря на большое количество известных алгоритмов настройки RIS, при проектировании и внедрении беспроводных систем с поддержкой RIS возникают проблемы. Общее количество каналов, связанных с RIS, быстро увеличивается с ростом количества отражающих элементов, особенно при наличии нескольких антенн на передатчике/приемнике. Поэтому задача настройки RIS, состоящего из большого количества элементов (несколько сотен) становится вычислительно сложной, что не позволяет производить настройку RIS на устройствах, обладающих ограниченными вычислительными мощностями. Поэтому необходимо разработать упрощение, которое позволяет снизить вычислительную сложность алгоритмов настройки RIS без значительных потерь в точности.

Одними из методов снижения вычислительной сложности алгоритмов настройки является рассмотрение канала в режиме асимптотически низкого SNR и в режиме высокого SNR [8], однако, такой метод не позволяет добиться снижения вычислительной сложности при промежуточных значениях SNR. Альтернативным методом является *снижение размерности системы* путем использования ограниченного количества пространственных потоков с самой большой пропускной способностью. В данной работе рассматривается метод снижения вычислительной сложности алгоритма настройки RIS, основанный на снижении размерности канальных матриц.

Дальнейшее изложение работы устроено следующим образом. В разделе 2 представлена модель связи в системе с RIS. После этого в разделе 3 даётся описание используемого алгоритма непрерывной настройки RIS. В разделе 4 описывается предлагаемый метод снижения размерности. Далее, в разделе 5 приведены численные результаты полученные в процессе исследования. Раздел 6 завершает данную работу.

2 Модель системы с RIS

В этом разделе представлена модель системы с RIS при наличии препятствий (кластеров рассеяния) на пути распространения сигнала или отражающих элементов. Эта модель используется при постановке задачи настройки RIS.

Излучаемый на передатчике (Tx) сигнал, проходя через кластеры и канал с RIS, рассеивается и поступает на приемник (Rx) в виде суперпозиции нескольких сигналов. На Рис. 1 показана схема канала с RIS при наличии кластеров. Беспроводной канал связи между Tx и Rx состоит из нескольких каналов, а именно из прямого канала Tx-Rx, канала Tx-RIS между Tx и RIS и канала RIS-Rx между RIS и Rx. Каждый из описанных каналов может иметь несколько кластеров. Используя платформу моделирования из работы ??, при заданном состоянии кластеров формируется импульсный отклик

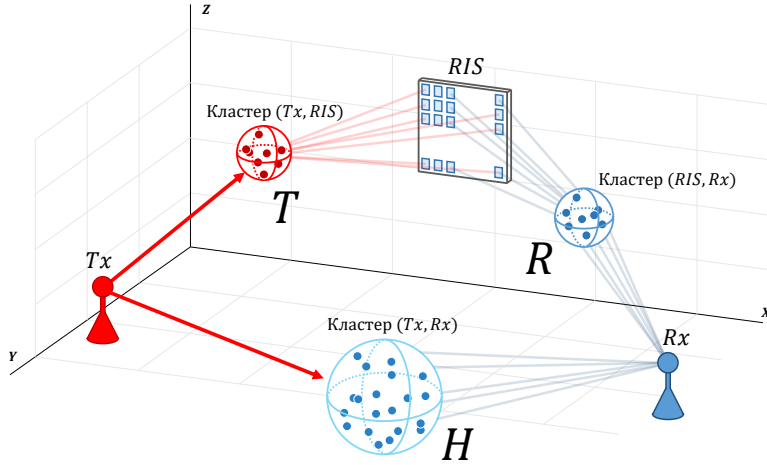


Рис. 1: Рассматриваемое окружение RIS, Tx и Rx со случайным числом кластеров.

канала для пары приемник и передатчик. Через импульсную характеристику можно получить значения комплексного усиления канала для определенной поднесущей. Для устройств с несколькими антеннами коэффициент усиления становится матрицей коэффициентов с размерностью, соответствующей количеству антенн на передатчике и приемнике. Рассмотрим процесс передачи сигнала через RIS с M элементами. Сигнал \mathbf{y} , полученный на Rx с числом антенн $N_r \geq 1$ и переданный несколькими Tx-антеннами $N_t \geq 1$, может быть выражен в векторной форме

$$\mathbf{y} = \mathcal{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\eta} \equiv (\mathbf{R}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{T} + \mathbf{H})\mathbf{x} + \boldsymbol{\eta}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ — вектор сигнала, переданного от Tx с мощностью $P_t = \mathbb{E}\{\|\mathbf{x}\|^2\}$, $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ — вектор сигнала, принятый на Rx. $\mathcal{H} = \mathbf{R}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{T} + \mathbf{H}$ — полная матрица канала между Tx и Rx, включающая в себя прямой канал Tx-Rx $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ и канал, проходящий через RIS — $\mathbf{R}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{T}$, $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{N_r \times M}$ — матрица канала между RIS и Rx, $\mathbf{T} \in \mathbb{C}^{M \times N_t}$ — матрица канала между Tx и RIS. Вектор $\boldsymbol{\eta} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_{N_r})$ обозначает вектор АБГШ (Аддитивный Белый Гауссовский Шум) на Rx со средней мощностью σ^2 . Матрица отклика элементов RIS

$$\boldsymbol{\Phi} = \text{diag}(\alpha_1, \dots, \alpha_M) \in \mathbb{C}^{M \times M} \quad (2)$$

является диагональной матрицей, в которой каждый элемент соответствует усилению сигнала в $|\alpha_i|$, $i = \overline{1, M}$ раз и повороту его фазы на угол $\arg\{\alpha_i\}$, $i = \overline{1, M}$ при отражении от соответствующего по номеру элемента RIS.

3 Алгоритм настройки RIS

В данном разделе даётся формулировка оптимизационной задачи одновременной настройки отражающих элементов RIS и распределения мощности сигналов на Tx с целью максимизации пропускной способности однопользовательской MIMO-системы в предположении, что на RIS известна идеальная CSI, т.е. матрицы каналов \mathbf{H} , \mathbf{R} , \mathbf{T} . Под идеальной CSI будем понимать точные матрицы каналов между парами устройств.

Используя системную модель канала с RIS из раздела 2, проведем постановку задачи оптимизации пропускной способности системы. Рассмотрим MIMO-систему с $N_t \geq 1$ антеннами на Tx и $N_r \geq 1$ антеннами на Rx, RIS оборудован M отражающими элементами. В частности, $\alpha_m \in \mathbb{C}$ обозначает отражающий коэффициент m -го элемента RIS, причем $|\alpha_m| = 1, \forall m = 1, \dots, M$, в то время как фаза каждого α_m может изменяться в пределах $[0, 2\pi)$. В дополнение к величинам, введенным в разделе 2, обозначим через $\mathbf{Q} = \mathbb{E}[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$ ковариационную матрицу передаваемого с Tx сигнала, причем $\mathbf{Q} \succeq 0$. Ставится ограничение на среднюю суммарную мощность на передатчике: $P_t = \mathbb{E}[\|\mathbf{x}\|^2] \leq P$, что эквивалентно условию $\text{tr}(\mathbf{Q}) \leq P$. Согласно работе [9], пропускная способность MIMO-канала определяется выражением

$$C = \max_{\mathbf{Q}: \text{tr}(\mathbf{Q}) \leq P, \mathbf{Q} \succeq 0} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^H \right) \text{ [бит/с/Гц]}. \quad (3)$$

Для MIMO-канала без RIS пропускная способность определяется только матрицей канала \mathbf{H} , которая фигурирует в выражении (1). Общий канал MIMO с поддержкой RIS, описываемый (1), зависит от матрицы отклика RIS $\mathbf{\Phi}$, поскольку она влияет на эффективную матрицу канала \mathbf{H} и на оптимальное значение матрицы \mathbf{Q} .

Задачу максимизации пропускной способности MIMO-канала с поддержкой RIS можно решить путем совместной оптимизации матрицы коэффициентов RIS $\mathbf{\Phi}$ и ковариационной матрицы \mathbf{Q} [5]. С учетом единичных ограничений на коэффициенты отражения и ограничения суммарной мощности передатчика задача принимает вид

$$\max_{\mathbf{\Phi}, \mathbf{Q}} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^H \right) \quad (4a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{\Phi} = \text{diag} \{ \alpha_1, \dots, \alpha_M \}, \quad (4b)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}\mathbf{\Phi}\mathbf{T} + \mathbf{H}, \quad (4c)$$

$$|\alpha_m| = 1, \quad m = 1, \dots, M, \quad (4d)$$

$$\text{tr}(\mathbf{Q}) \leq P, \quad (4e)$$

$$\mathbf{Q} \succeq 0. \quad (4f)$$

Основываясь на работе [8], приведем описание алгоритма настройки RIS и мощности на антеннах Tx в случае MIMO. Преобразуем задачу (4) в терми-

нах оптимизируемых переменных $\{\alpha_m\}_{m=1}^M \cup \{\mathbf{Q}\}$, а затем решим две подзадачи из задачи (4): оптимизация ковариационной матрицы \mathbf{Q} при заданных $\{\alpha_m\}_{m=1}^M$ и оптимизация одного коэффициента отражения α_m в матрице Φ при фиксировании $\{\alpha_i, i \neq m\}_{i=1}^M \cup \mathbf{Q}$.

Введём обозначения в (4а), упрощающие дальнейшее повествование. Перепишем матрицы \mathbf{R} и \mathbf{T} в виде $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_M]$ и $\mathbf{T} = [\mathbf{t}_1, \dots, \mathbf{t}_M]^H$, где $\mathbf{r}_m \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ и $\mathbf{t}_m^H \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$, тогда матрица ММО-канала с RIS принимает вид

$$\mathcal{H} = \mathbf{H} + \sum_{m=1}^M \alpha_m \mathbf{r}_m \mathbf{t}_m^H. \quad (5)$$

Из данного выражения хорошо прослеживается вид матрицы канала с RIS — это сумма матрицы \mathbf{H} и M одноранговых матриц $\mathbf{r}_m \mathbf{t}_m^H$, каждая из которых домножена на коэффициент α_m .

Далее, используя спектральное разложение матрицы \mathbf{Q} , обозначим ее как $\mathbf{Q} = \mathbf{U}_Q \Sigma_Q \mathbf{U}_Q^H$, где $\mathbf{U}_Q \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$, $\Sigma_Q \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$. Поскольку \mathbf{Q} является положительно полуопределенной матрицей, то все диагональные элементы Σ_Q являются неотрицательными действительными числами. Введем матрицы $\mathbf{H}' = \mathbf{H} \mathbf{U}_Q \Sigma_Q^{\frac{1}{2}} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ и $\mathbf{T}' = \mathbf{T} \mathbf{U}_Q \Sigma_Q^{\frac{1}{2}} = [\mathbf{t}'_1, \dots, \mathbf{t}'_M]^H \in \mathbb{C}^{M \times N_t}$, где $\mathbf{t}'_m = \Sigma_Q^{\frac{1}{2}} \mathbf{U}_Q^H \mathbf{t}_m \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$.

Приведем решение каждой подзадачи оптимизации.

Оптимизация \mathbf{Q} при фиксированных $\{\alpha_m\}_{m=1}^M$ При заданных коэффициентах отражения $\{\alpha_m\}_{m=1}^M$ т.е. полностью заданной матрице канале \mathcal{H} оптимизируем ковариационную матрицу передачи \mathbf{Q} . Оптимальное \mathbf{Q} достигается при передаче в *собственных каналах* (англ.: eigenmode transmission) [10]. Каждый ненулевой собственный канал может поддерживать поток данных; таким образом, ММО-канал может поддерживать пространственное мультиплексирование множества потоков.

Используя сингулярное разложение для \mathcal{H} , получаем $\mathcal{H} = \tilde{\mathbf{U}} \tilde{\mathbf{\Lambda}} \tilde{\mathbf{V}}^H$, где $\tilde{\mathbf{U}} \in \mathbb{C}^{N_r \times D}$, $\tilde{\mathbf{V}} \in \mathbb{C}^{N_t \times D}$, $\tilde{\mathbf{\Lambda}} \in \mathbb{C}^{D \times D}$ — диагональная матрица с неотрицательными элементами. $D = \text{rank}(\mathcal{H}) \leq \min(N_t, N_r)$ определяет максимальное число пространственных потоков в канале, задаваемом матрицей \mathcal{H} . Оптимальное \mathbf{Q} дается выражением

$$\mathbf{Q}^* = \tilde{\mathbf{V}} \cdot \text{diag}\{p_1^*, \dots, p_D^*\} \cdot \tilde{\mathbf{V}}^H, \quad (6)$$

где p_i^* обозначает оптимальное количество энергии, выделяемое на i -ый пространственный поток, согласно «алгоритму заполнения водой» (англ.: water-filling strategy):

$$p_i^* = \max\left(\frac{1}{p_0} - \frac{\sigma^2}{[\tilde{\mathbf{\Lambda}}]_{i,i}^2}, 0\right), i = 1, \dots, D, \quad (7)$$

где p_0 выбирается таким образом, что $\sum_{i=1}^D p_i^* = P$, а $[\tilde{\mathbf{\Lambda}}]_{i,i}$ — сингулярные числа из матрицы $\tilde{\mathbf{\Lambda}}$.

Оптимизация α_m при фиксированных $Q \cup \{\alpha_i, i \neq m\}_{i=1}^M$ При заданных Q и $\{\alpha_i, i \neq m\}_{i=1}^M, \forall m \in \mathcal{M}$ оптимизируем α_m . В работе [5] показано, что для каждого выбранного α_m функцию (4а) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{1}{\sigma^2} \mathcal{H} Q \mathcal{H}^H \right) &\triangleq f_m = \\ &= \log_2 \det (\mathbf{A}_m + \alpha_m \mathbf{B}_m + \alpha_m^* \mathbf{B}_m^H) = \\ &= \log_2 \det (\mathbf{I}_{N_r} + \alpha_m \mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m + \alpha_m^* \mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m^H) + \\ &+ \log_2 \det (\mathbf{A}_m) \quad \forall m \in \mathcal{M}, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\mathbf{A}_m = \mathbf{I}_{N_r} + \frac{1}{\sigma^2} \left(\mathbf{H}' + \sum_{i=1, i \neq m}^M \alpha_i \mathbf{r}_i \mathbf{t}_i^H \right) \times \quad (9)$$

$$\times \left(\mathbf{H}' + \sum_{i=1, i \neq m}^M \alpha_i \mathbf{r}_i \mathbf{t}_i^H \right)^H + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{r}_m \mathbf{t}_m^H \mathbf{t}_m' \mathbf{r}_m^H, \forall m \in \mathcal{M},$$

$$\mathbf{B}_m = \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{r}_m \mathbf{t}_m^H \left(\mathbf{H}'^H + \sum_{i=1, i \neq m}^M \mathbf{t}_i' \mathbf{r}_i^H \alpha_i^* \right), \forall m \in \mathcal{M}. \quad (10)$$

являются невырожденными квадратными матрицами размера $N_r \times N_r$.

Ключевую роль в определении оптимального значения α_m играет произведение матриц $\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m$. Можно показать, что $\text{rank} (\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m) \leq 1$. В случае $\text{rank} (\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m) = 0$, т.е. когда $\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m = \mathbf{0}$, любое α_m такое, что $|\alpha_m| = 1$ является оптимальным для задачи (4) и его можно выбрать равным единице. Далее рассматривается случай $\text{rank} \mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m = 1$. Этот случай делится на два других случая, реализация которых зависит от диагоналируемости матрицы $\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m$, причем это произведение диагоналируемо тогда и только тогда, когда $\text{tr} (\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m) \neq 0$. Рассмотрим в отдельности случаи диагоналируемой и недиагоналируемой матрицы $\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m$.

1) $\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m$ *диагоналируема*. В этом случае существует сингулярное разложение матрицы $\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m$, а так как её ранг равен единице, то $\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m = \mathbf{U}_m \boldsymbol{\Sigma}_m \mathbf{U}_m^{-1}$, где $\boldsymbol{\Sigma}_m = \text{diag} \{ \lambda_m, 0, \dots, 0 \} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_r}$, с единственным ненулевым сингулярным числом $\lambda_m \in \mathbb{C}$. Оптимальным значением α_m в таком случае является

$$\alpha_m^* = e^{-j \arg \{ \lambda_m \}}. \quad (11)$$

2) $\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m$ *недиагоналируема*. Оказывается, что если $\text{tr} (\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m) = 0$, то любое α_m , такое что $|\alpha_m| = 1$, является оптимальным для (4), поэтому в качестве оптимального можно выбрать

$$\alpha_m^* = 1. \quad (12)$$

Подводя итог, оптимальным решением (4) при фиксированных переменных Q и $\{\alpha_i, i \neq m\}_{i=1}^M$ является

$$\alpha_m^* = \begin{cases} e^{-j \arg\{\lambda_m\}}, & \text{если } \text{tr}(\mathbf{A}_m^{-1} \mathbf{B}_m) \neq 0 \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (13)$$

Приведем окончательный вид алгоритма. Вначале выбирается $L > 1$ множество $\{\alpha_m\}_{m=1}^M$, $|\alpha_m| = 1, \forall m$, фазы которых получаются случайным образом из равномерного распределения на множестве $[0, 2\pi)$. Получив оптимальную ковариационную матрицу передачи \mathbf{Q} для каждого набора $\{\alpha_m\}_{m=1}^M$ согласно (6), а также соответствующую пропускную способность канала, выбираем набор с максимальной пропускной способностью в качестве исходных значений для алгоритма. Затем алгоритм переходит к итеративному решению двух подзадач, представленных в этом разделе. Критерием остановки является достижение необходимой точности сходимости целевой функции пропускной способности или превышение максимального числа итераций алгоритма.

При помощи описанного алгоритма получается оптимальное решение каждой подзадачи. Таким образом, монотонная сходимость алгоритма гарантирована, поскольку он дает неубывающее на итерациях значение пропускной способности, определяемой с помощью выражения (4а), которое ограничено сверху конечной пропускной способностью.

4 Снижение размерности системы

В данной работе предлагается метод снижения вычислительной сложности, основанный на снижении размерности системы. Общий алгоритм настройки RIS обладает очень высокой вычислительной сложностью и требует знания идеальной CSI. Поэтому его невозможно использовать на реальных прототипах RIS. В то же время предложенные в работе [8] упрощения в случае высокого и низкого SNR применимы в асимптотических пределах, границы которых в оригинальных работах явно не определены. Поэтому нами разработано упрощение, позволяющее снизить вычислительную сложность общего алгоритма и при промежуточных значениях SNR.

Если мощности и/или расстояния между устройствами в системе оказались такими, что не реализуется ни случай высокого SNR, ни случай низкого SNR, то асимптотические по SNR методы снижения вычислительной сложности неприменимы. В таком случае можно снизить сложность исходного алгоритма путем снижения размерности системы. Это можно сделать, приближая заданные матрицы канала \mathbf{H} , \mathbf{R} , \mathbf{T} другими матрицами \mathbf{H}_k , \mathbf{R}_k , \mathbf{T}_k с заранее заданным рангом k . Известна теорема Эккарта — Янга [11]:

Если потребовать, чтобы приближение произвольной матрицы \mathbf{A} матрицей \mathbf{A}_k являлось наилучшим в смысле минимизации нормы Фробениуса разности \mathbf{A} и \mathbf{A}_k при условии, что $\text{rank}(\mathbf{A}_k) = k$, то наилучшая матрица \mathbf{A}_k получается из сингулярного разложения матрицы \mathbf{A} по формуле

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma}_k \mathbf{V}^H,$$

где Σ_k получается из матрицы Σ заменой на нуль всех диагональных элементов кроме k наибольших. При сингулярном разложении диагональные элементы в Σ упорядочены по невозрастанию, поэтому $\mathbf{A}_k = \mathbf{U}_k \Sigma_k \mathbf{V}_k^H$, где матрицы \mathbf{U}_k , Σ_k , \mathbf{V}_k получаются из соответствующих матриц в сингулярном разложении матрицы \mathbf{A} обрезанием до первых k столбцов.

Использование только k первых сингулярных чисел позволяет уменьшить вычислительную сложность алгоритма настройки. Асимптотическая сложность при сохранении размерности матриц имеет вид

$$\mathcal{O}((3N_r^3 + 2N_r^2 N_t + N_t^2) M + N_r N_t \min(N_r, N_t) I), \quad (14)$$

где I — число итераций алгоритма. При сохранении во всех матрицах каналов k сингулярных чисел оценка вычислительной сложности принимает вид:

$$\mathcal{O}((5k^3 + k^2) M + k^3 I + N_r N_t \min(N_r, N_t)), \text{ где } k < \min(N_r, N_t). \quad (15)$$

Поскольку коэффициент перед M в выражении (15) меньше, чем в выражении (14), то модифицированный алгоритм имеет более низкую вычислительную сложность, чем исходный.

5 Численные результаты

Перейдем к рассмотрению численных результатов сравнения пропускной способности, полученной при помощи исходного алгоритма настройки (верхняя граница) и его модификаций. Для получения численных результатов использованы значения канальных матриц сгенерированные при помощи платформы моделирования систем с RIS из работы [2]. Метод снижения размерности рассматривался при сохранении $k = \{1, 2, 4\}$ первых сингулярных чисел. В описанных ниже экспериментах рассматривалась MIMO-система 8×8 с одним RIS, имеющим 400 элементов, центральная частота равна 5.3 ГГц. Расстояние от RIS до Rx равно 5 м, дистанция между Tx и Rx равна 400 м, диапазон SNR — (7...45) дБ при мощности АБГШ —100 дБм.

На Рис. 2 изображена зависимость пропускной способности системы с RIS при использовании исходного алгоритма настройки и его модификаций. Можно видеть, что предлагаемый метод при сохранении $k = 4$ первых сингулярных чисел в матрицах каналов позволяет превзойти модификации, применимые для низкого и высокого SNR при исследованных расстояниях между Tx и Rx. Расхождение с верхней границей пропускной способности не превосходит 5%. Сохранение $k = 2$ первых сингулярных чисел позволяет добиться расхождения с верхней границей не более чем на 10%.

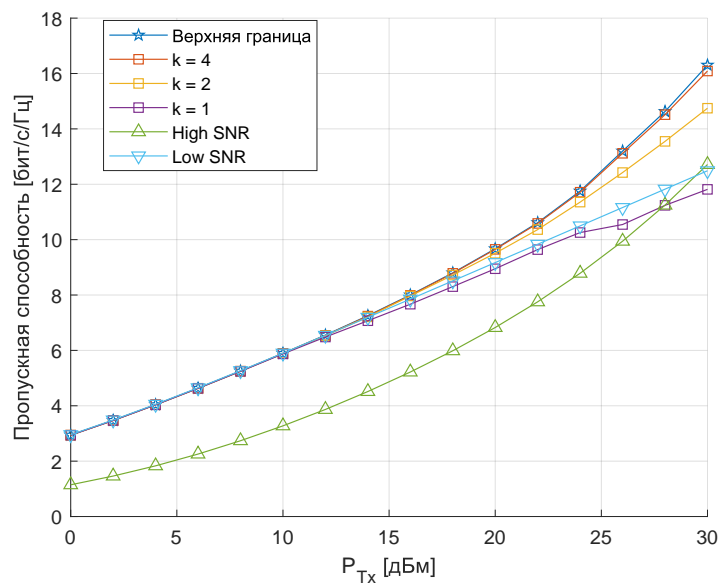


Рис. 2: Сравнение пропускных способностей системы с RIS при использовании различных модификаций алгоритма настройки.

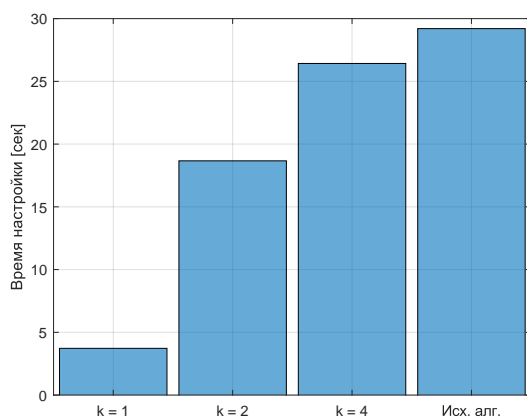


Рис. 3: Сравнение времени исполнения алгоритма настройки при разных k.

При тех же параметрах эксперимента рассмотрим снижение времени исполнения алгоритма настройки при сохранении $k = \{1, 2, 4\}$ сингулярных чисел в канальных матрицах. Из Рис. 3 видно, что предлагаемый метод при $k = 2$ и $k = 4$ позволяет снизить время исполнения алгоритма на 40% и 13% соответственно. Сохранение единственного сингулярного числа значительно снижает вычислительную сложность алгоритма, но точность настройки при этом является неудовлетворительной.

6 Заключение

В ходе данной работы был исследован метод снижения вычислительной сложности алгоритма настройки RIS, основанный на снижении размерности канальных матриц, и была доказана возможность использования $k = 2$ наибольших сингулярных чисел матриц каналов для оценки пропускной способности системы. Снижение времени настройки RIS при использовании $k = 2$ сингулярных чисел составило 40% при потере в точности настройки в 10%. Результаты показывают, что использование предложенного метода снижения вычислительной сложности алгоритма настройки RIS является перспективным для использования.

Список литературы

1. Enabling indoor mobile millimeter-wave networks based on smart reflect-arrays / Tan Xin, Sun Zhi, Koutsonikolas Dimitrios, and Jornet Josep M // IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications / IEEE. — 2018. — P. 270–278.
2. Буртаков И.А. Куреев А.А. Ендовицкий Е.О. Моделирование беспроводных сетей с реконфигурируемой интеллектуальной поверхностью // Сборник трудов 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ. — 2021. — С. 91–92.
3. Reconfigurable Intelligent Surfaces: A signal processing perspective with wireless applications / Björnson Emil, Wymeersch Henk, Matthiesen Bho, Popovski Petar, Sanguinetti Luca, and de Carvalho Elisabeth // IEEE Signal Processing Magazine. — 2022. — Vol. 39, no. 2. — P. 135–158.
4. Yigit Zehra, Basar Ertugrul, Altunbas Ibrahim. Low Complexity Adaptation for Reconfigurable Intelligent Surface-Based MIMO Systems // IEEE Communications Letters. — 2020. — Vol. 24, no. 12. — P. 2946–2950.
5. Zhang Shuowen, Zhang Rui. Capacity characterization for intelligent reflecting surface aided MIMO communication. — 2019. — 10.
6. Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in Wireless Communication / Chongwen Huang, Zappone Alessio, Alexandropoulos George, Debbah mérouane, and Yuen Chau // IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2019. — 06. — Vol. PP. — P. 1–1.
7. Zheng Beixiong, Zhang Rui. Intelligent Reflecting Surface-Enhanced OFDM: Channel Estimation and Reflection Optimization // IEEE Wireless Communications Letters. — 2020. — Vol. 9, no. 4. — P. 518–522.
8. Zhang Shuowen, Zhang Rui. On the capacity of intelligent reflecting surface aided MIMO communication // 2020 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT) / IEEE. — 2020. — P. 2977–2982.

9. Telatar Emre. Capacity of multi-antenna Gaussian channels // European transactions on telecommunications. — 1999. — Vol. 10, no. 6. — P. 585-595.
10. Tse David, Viswanath Pramod. Fundamentals of wireless communication. — Cambridge university press, 2005.
11. Chu Moody T, Funderlic Robert E, Plemmons Robert J. Structured low rank approximation // Linear algebra and its applications. — 2003. — Vol. 366. — P. 157-172.

Исследование методов дискретизации непрерывного решения задачи настройки реконфигурируемой интеллектуальной поверхности

Николай Козловский¹, Илья Буртаков^{1,2}, Алексей Куреев^{2,3}

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

³ Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики

Аннотация Одним из способов увеличить пропускную способность современных беспроводных сетей, таких как Wi-Fi и 5G, без значительных затрат на изменение и поддержание инфраструктуры является использование реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (англ.: Reconfigurable Intelligent Surface, RIS). RIS представляет собой двумерную поверхность, состоящую из элементов, обеспечивающих программно контролируемое изменение амплитуды и сдвиг по фазе отраженной от них электромагнитной волны. При помощи динамического управления направлением отраженного сигнала, RIS может быть использована для повышения пропускной способности сети. С технической точки зрения, элементы RIS, поддерживающие дискретный набор допустимых фазовых сдвигов, являются более простыми и дешевыми в реализации по сравнению с элементами, архитектура которых поддерживает непрерывные значения фазовых сдвигов. В данной работе подробно исследован метод округления непрерывного решения задачи настройки RIS, обладающий линейной сложностью относительно числа элементов. Также, проведено сравнение рассматриваемого метода с аналогами с точки зрения пропускной способности, рассмотрен вопрос стабильности метода округления при передаче на краях полосы частот.

Ключевые слова: реконфигурируемые интеллектуальные поверхности, 5G, MIMO, квантование

1 Введение

С развитием сотовых сетей пятого поколения (5G), а также технологий, поддерживающих обработку и передачу данных виртуальной реальности,

* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

значительно выросли объем и плотность передаваемого трафика. Одним из способов решения этой проблемы и одновременно обеспечения баланса между производительностью и низкой стоимостью используемого оборудования является применение реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (англ.: Reconfigurable Intelligent Surface, RIS). При помощи внешнего управления можно осуществлять настройку RIS, а именно изменять фазы и амплитуды отраженных сигналов, тем самым добиваясь повышения пропускной способности канала относительно канала без RIS без значительных энергозатрат.

RIS представляет собой двумерную поверхность, состоящую из большого числа пассивных отражающих элементов, каждый из которых независимо от других может быть программным образом настроен на взаимодействие с падающей на него электромагнитной волной. RIS может быть построена при помощи так называемой «метаповерхности», образованной набором управляющих элементов из искусственного электромагнитного метаматериала. В основе управляющих элементов RIS лежат преимущественно варикапы и PIN-диоды [1]. Архитектура элементов RIS определяет множество значений фаз, на которые могут быть изменены отраженные сигналы.

В существующей литературе рассматриваются два основных класса настройки параметров системы с RIS — непрерывный и дискретный, — соответствующие диапазонам фазовых сдвигов, которые поддерживаются архитектурой RIS. В работе [2] подробно исследована задача непрерывной настройки для максимизации пропускной способности. Авторы данной работы предлагают алгоритмы для совместной настройки фазовых сдвигов и оптимизации распределения мощности по антеннам передатчика в случае MIMO-систем, которые учитывают случаи передачи сигнала несколькими поднесущими. Кроме этого, авторы рассматривают случаи асимптотически низкого и высокого отношения сигнал-шум на приемнике. Работы [3], [4] решают задачу непрерывной настройки для систем MU-MISO (англ.: Multiuser Multiple Input Single Output), но различаются характером рассматриваемой целевой функции: пропускная способность в [3] или минимальная мощность передачи для достижения необходимого отношения сигнал-шум в [4].

Важно отметить, что алгоритмы оптимизации пропускной способности для непрерывной настройки значительно превосходят аналогичные методы с условием на дискретность значений фазовых сдвигов по точности и имеют более низкую вычислительную сложность [5]. Тем не менее, аппаратная реализация элементов RIS, поддерживающих непрерывную настройку, является дорогостоящей. Существуют работы [3], [6], посвященные разработке дискретных алгоритмов для MU-MISO систем. Работа [3] посвящена оптимизации пропускной способности, в то время как работа [6] — минимальной мощности передачи сигнала. Авторы работы [7] предлагают метод настройки RIS для MIMO-систем, который основан на решении задачи непрерывной настройки, обладающий из-за этого низкой вычислительной сложностью. Далее авторы работы [7] предлагают округлять фазовые сдвиги до ближайших значений из дискретного множества на каждой итерации алгоритма.

Все описанные выше алгоритмы предполагали известными характеристики каналов между каждой парой устройств в системе. Помимо задачи настройки, когда каналные условия известны, в литературе затрагивается вопрос совместной оценки каналов и настройки RIS. Этой теме посвящено исследование [8], в котором разработан соответствующий алгоритм для MIMO-систем, где классическая оценка характеристик каналов при помощи пилотных сигналов происходит параллельно с выбором дискретных значений фазовых сдвигов статистическими методами. Кроме этого, в работе [8] рассматривается метод округления решения задачи непрерывной настройки аналогичный [7].

Как показывает анализ алгоритмов настройки RIS, известных из приведенной литературы, метод округления непрерывной настройки, использованный в [7], [8], не был детально изучен, несмотря на его низкую сложность, и не была показана его оптимальность с точки зрения достигаемой пропускной способности. Работы [9], [10], рассматривающие эффективность систем с RIS при различных частотах, не затрагивают вопрос стабильности метода округления настройки RIS. Настоящая работа посвящена анализу метода дискретной настройки RIS для MIMO-систем, который основан на округлении решения соответствующей непрерывной задачи оптимизации. Приводится анализ метода округления до ближайшего и показано, что он является наилучшим методом округления в заданном множестве дискретных фаз элементов RIS. Кроме этого, рассматривается вопрос стабильности решения, полученного методом округления, при передаче на границах полосы частот при условии, что настройка производилась по центральной частоте.

Для решения поставленной задачи используется платформа имитационного моделирования передачи сигнала с учетом влияния RIS. Перечислим основные результаты данной работы.

- Проведен анализ функции пропускной способности, который обосновывает применимость метода округления после окончания работы алгоритма непрерывной настройки. Т.е. показано, что пропускная способность не может быть увеличена путем выбора другого набора дискретных фаз.
- Метод дискретизации из работы [8] и рассматриваемый в этой работе метод сравнены между собой в MIMO-сценарии по достижимой пропускной способности.
- Рассмотрен вопрос стабильности решения, полученного методом округления при передаче на границах полосы.

Дальнейшее изложение работы устроено следующим образом. Раздел 2 подробно описывает модель системы передачи данных. В разделе 3 представлено описание метода округления решения, полученного после непрерывной настройки, а также анализ функции пропускной способности системы. В разделе 4 приведено описание сценариев для численного моделирования, продемонстрированы результаты сравнения алгоритмов настройки, а также результаты, связанные со стабильностью метода округления при изменении частоты. Раздел 5 завершает данную работу.

2 Модель системы

Рассмотрим узкополосную ММО-систему с N_t антеннами на передатчике Tx и N_r антеннами на приемнике Rx. В системе присутствует RIS, состоящий из M отражающих элементов, как показано на рис. 1. Матрицы каналов между устройствами Tx–Rx, Tx–RIS и RIS–Rx обозначим через $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$, $\mathbf{T} \in \mathbb{C}^{M \times N_t}$ и $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{N_r \times M}$ соответственно. Матрица $\mathbf{\Phi} = \text{diag}\{\alpha_1, \dots, \alpha_M\}$ обозначает диагональную матрицу откликов элементов RIS, где $\alpha_m = e^{i\varphi_m}$ — коэффициент отражения, который обеспечивает фазовый сдвиг соответствующего элемента RIS φ_m . В данной работе рассматривается архитектура RIS, в условиях которой изменение амплитуды сигнала нереализуемо, поэтому все коэффициенты отражения по амплитуде принимаются равными единице $|\alpha_m| = 1$. Общий канал $\tilde{\mathbf{H}}$ представляет собой сумму прямого канала Tx–Rx \mathbf{H} и канала $\mathbf{R}\mathbf{\Phi}\mathbf{T}$, проходящего через RIS. Тогда матрицу совместного канала между Tx, RIS и Rx можно представить как суперпозицию $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H} + \mathbf{R}\mathbf{\Phi}\mathbf{T}$ [11]. Вектор сигнала \mathbf{y} , принимаемого на Rx можно представить в виде

$$\mathbf{y} = \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ — вектор излучаемого на Tx сигнала, $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_{N_r})$ — вектор белого гауссовского шума на антеннах Rx со средней мощностью σ^2 . В такой модели канала пропускная способность может быть рассчитана как

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{1}{\sigma^2} \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{Q}\tilde{\mathbf{H}}^H \right), \quad (2)$$

где $\mathbf{Q} = \mathbb{E}[\mathbf{x}\mathbf{x}^H]$ — ковариационная матрица мощности на излучателях Tx [12]. При этом, суммарная мощность передачи сигнала является ограниченной и равна $P = \text{tr}(\mathbf{Q})$.

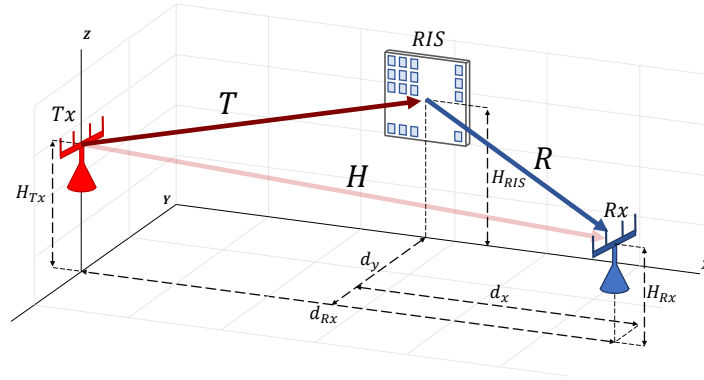


Рис. 1: Модель системы передачи данных при использовании RIS.

3 Алгоритмы настройки

Алгоритм непрерывной настройки [2] и метод округления фаз элементов RIS [8] в качестве входных данных используют известные матрицы каналов \mathbf{H} , \mathbf{R} , \mathbf{T} , участвующие в выражении (1). Они работают по принципу последовательной оптимизации. На каждой итерации из общего набора выбирается одна переменная, относительно которой происходит оптимизация (или округление), а остальные фиксируются. На последующих итерациях в качестве оптимизируемой выбирается другая переменная. Алгоритм продолжает работу до тех пор, пока не превышено максимальное число итераций или не достигнута приемлемая точность. Результатом работы совместного алгоритма настройки RIS и мощностей на антеннах Tx [2] являются ковариационная матрица \mathbf{Q} распределения мощности по антеннам передатчика Tx и матрица фазовых сдвигов на элементах RIS $\Phi = \text{diag}\{\alpha_1, \dots, \alpha_M\}$.

Метод округления

Пусть архитектура элемента RIS поддерживает b -битное квантование. Тогда соответствующее число уровней $L = 2^b$ образует множество допустимых значений фазовых сдвигов $\mathcal{F} = \{0, 2\pi\frac{1}{L}, \dots, 2\pi\frac{L-1}{L}\}$. Рассматриваемый метод округления непрерывного решения задачи настройки RIS состоит в том, чтобы сначала воспользоваться алгоритмом непрерывной настройки [2] для получения ковариационной матрицы \mathbf{Q} и матрицы отклика Φ на элементах RIS, а затем провести округление фаз в матрице Φ . Каждый коэффициент отражения $\alpha_m = e^{i\varphi_m}$ определяется аргументом φ_m , который округляется до ближайшего значения из множества \mathcal{F} .

Основным отличием такого метода округления от метода, предложенного в работе [8], является применение округления после настройки непрерывным образом фаз всех элементов RIS, в то время как авторы работы [8] производят округление на каждом шаге оптимизации, получая оптимальный набор дискретных фаз после окончания работы алгоритма.

Полученная в результате округления матрица фазовых сдвигов $\Phi_{\mathcal{F}}$ вместе с \mathbf{Q} используется для дискретной настройки системы с RIS и дальнейшего сравнения с другими алгоритмами по пропускной способности с помощью выражения (2). Далее рассмотрим обоснование применимости такого метода округления.

Анализ пропускной способности

В работе [2] показано, что пропускную способность MIMO-системы с RIS можно представить как функцию от одной переменной фазового сдвига φ_m на m -ом элементе RIS:

$$C_m = \log_2 \left(1 + |\lambda_m|^2 (1 - \nu'_{m1}\nu_{m1}) + 2|\lambda_m| \cos(\varphi_m + \arg \lambda_m) \right). \quad (3)$$

где $\lambda_m, \nu'_{m1}, \nu_{m1}$ — константы, не зависящие от ϕ_m .

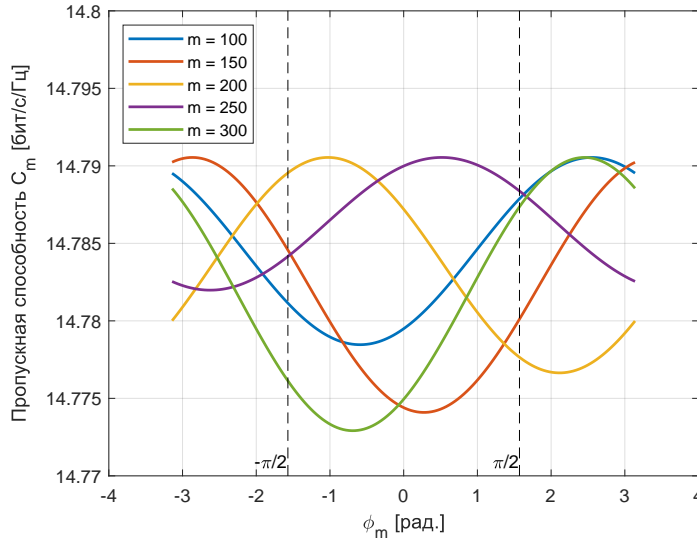


Рис. 2: Зависимость пропускной способности системы от ϕ_m , когда другие фазовые сдвиги $\phi_i, i \neq m$ зафиксированы после непрерывной настройки RIS.

Как видно из выражения (3), функция, стоящая под логарифмом, является гармонической, поэтому она симметрична относительно своих экстремумов. На рис. 2 представлена зависимость пропускной способности системы от значения фазового сдвига ϕ_m на m -ом элементе RIS при условии, что остальные значения $\phi_i, i \neq m$ получены алгоритмом непрерывной настройки [2] в условиях сценария №2 согласно таблице 1 и фиксированы.

Наибольший интерес представляет расположение максимумов гармонических функций вдоль горизонтальной оси, поскольку наиболее значимые потери в пропускную способность при переходе от непрерывного к 1-битному дискретному набору фаз приносят элементы RIS, максимумы которых лежат ближе всего к соответствующим порогам округления в $\frac{\pi}{2}$ или $-\frac{\pi}{2}$ (например, $m = 200$ на рис. 2). Функция пропускной способности является симметричной относительно её максимума на полупериоды влево и вправо по горизонтальной оси. Кроме этого, максимумы пропускной способности функций C_m для разных m распределены по всему промежутку $[-\pi, \pi]$. Поэтому оптимальное значение фазы из дискретного набора для элемента m на текущей итерации получается округлением координаты максимума до ближайшей из этого набора.

4 Численные результаты

Рассмотрим фиксированные в пространстве Tx, Rx и RIS при выделенной мощности P на Tx. Матрицы каналов $\mathbf{H}, \mathbf{R}, \mathbf{T}$, участвующие в выражении (1), считаются известными и получаются из случайной реализации канала в платформе [13]. Алгоритмы непрерывной настройки [2], дискретизации [8] определяют оптимальную пропускную способность в соответствии с выражением (2). Сценарии, которые используются для численного моделирования в данной работе, приведены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры сценариев для моделирования.

№	1	2
Сценарий	3GPP 38.901 UMi NLoS	
P , дБм	0...30	
Центральная частота, ГГц	3,6	5,3
N_t	4	4
N_r	4	4
M	1600	900
d_{Rx} , м	150	65
d_x , м	0	5
d_y , м	5	10
H_{Tx} , м	2	2
H_{Rx} , м	2	2
H_{RIS} , м	3	3

Обоснование метода округления

Применение метода округления задачи непрерывной настройки RIS можно обосновать графиком, представленным на рис. 3. В данном эксперименте использовалась модель MIMO-системы в сценарии №2 с RIS, состоящим из 900 элементов. Положение максимума функции (3) пропускной способности (красный круг), рассмотренной в предыдущем разделе, определялось для выбранного элемента с номером m при квантовании непрерывной настройки RIS для N элементов. Чтобы рассматриваемый метод округления был «применим», пропускная способность должна быть максимальной для выбранного набора фаз элементов RIS. То есть пропускная способность не может быть увеличена путем выбора другого набора дискретных фаз. Для этого абсолютный сдвиг Δ максимума для соответствующего элемента m вдоль горизонтальной оси после квантования непрерывной настройки должен сдвигаться на величину много меньшую, чем расстояние между границами округления $\frac{\pi}{2}$ и $-\frac{\pi}{2}$. В противном случае последующее округление фаз

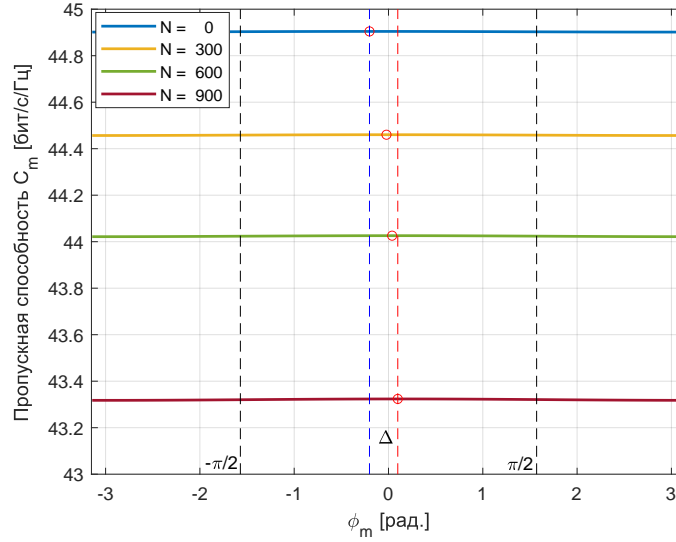


Рис. 3: Поведение функции пропускной способности (3) для элемента $m = 450$ при квантовании N элементов в сценарии №2.

других элементов могло сделать неправильным решение о выборе дискретной фазы элемента m .

Из приведенного графика видно, что сдвиг максимума пропускной способности из выражения (3) для выбранного элемента RIS не превышают значения $\Delta = 0.25$ рад. Это означает, что в процессе квантования, независимо от числа уже округленных фазовых сдвигов, максимум для элемента m незначительно перемещается вдоль горизонтальной оси. Вероятность того, что решение о выборе фазы некоторого элемента станет ошибочным после округления фаз всех элементов мала, поскольку расстояние Δ значительно меньше расстояния между границами округления и плотность расположения максимумов по горизонтальной оси не имеет выделенного максимума. Выбор фазы не оптимальным образом для малого числа элементов RIS слабо влияет на пропускную способность всей системы, поскольку значения фазы из дискретного множества в таком случае находятся примерно на равном расстоянии от максимума, что вносит примерно одинаковое падение точности настройки при округлении как вправо, так и влево. По этой причине округление фазового сдвига выбранного элемента RIS до ближайшего дискретного значения можно рассматривать локально, т.е. независимо от фаз других элементов. Следовательно, выбор оптимальной фазы для каждого элемента m в совокупности дает оптимальный набор дискретных фаз для всех элементов. Кроме того, из данных результатов следует, что квантование

алгоритма непрерывной настройки можно проводить после окончания работы алгоритма, а не во время его исполнения, поскольку сдвиг максимума функции пропускной способности выбранного элемента m слабо сдвигается при квантовании всех элементов RIS.

Результаты численного сравнения алгоритмов

Хотя квантование в 1-битном множестве значительно уступает непрерывной настройке в точности согласно результатам исследования [3], оно в дальнейшем используется для анализа пропускной способности систем с RIS, поскольку такое квантование проще с точки зрения имплементации в оборудовании.

Для моделирования проведено $I = 100$ итераций создания случайных канальных условий для усреднения в сценарии №1 согласно таблице 1, где в каждой итерации суммарная мощность передатчика P изменяется в диапазоне от 0 до 30 дБм с шагом в 2 дБм. На рис. 4 представлена зависимость пропускной способности системы от выделенной суммарной мощности P для непрерывной настройки [2], метода квантования из работы [8] и 1-битного округления непрерывного решения.

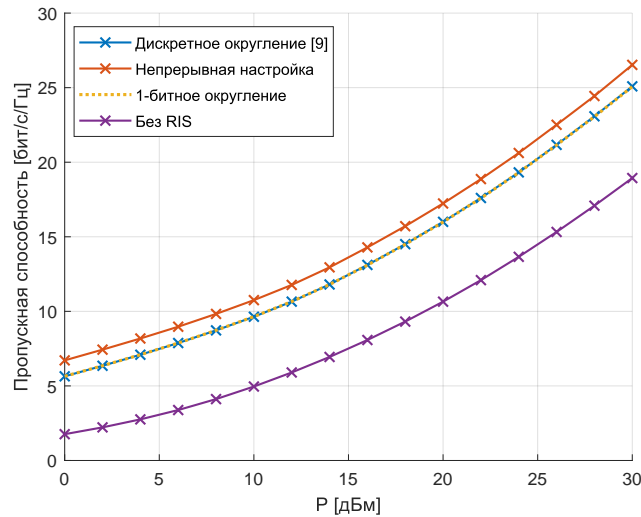


Рис. 4: Зависимость пропускной способности системы от выделенной мощности P для сценария №1.

Полученные результаты подтверждают выводы из исследования функции пропускной способности, приведенные в разделе 4 для обоснования ме-

тогда округления. Из рис. 2 видно, что метод последовательного округления, предложенный в [8] показывает результат, аналогичный округлению, проводимому после завершения работы алгоритма непрерывной настройки. Падение пропускной способности, связанное с округлением, достигает 1.6 бит/сек/Гц относительно непрерывной настройки вне зависимости от мощности передатчика, что дает возможность применять округление фаз элементов RIS в реальных системах. Рост пропускной способности при использовании RIS с дискретными фазами относительно системы без RIS составляет 8 бит/сек/Гц.

Анализ стабильности настройки при изменении центральной частоты

Рассмотрим вопрос стабильности решения задачи непрерывной настройки RIS с последующим округлением при изменении частоты. В данной работе считается, что характеристики элементов RIS не изменяются при изменении частоты падающего излучения или при изменении фаз самих элементов. Рассмотрим сценарий №1 согласно таблице 1 с RIS состоящим из M элементов. Настройка RIS производилась по частоте $f_0 = 3.6$ ГГц, в то время как расчет пропускной способности производился на центральной частоте и на грани

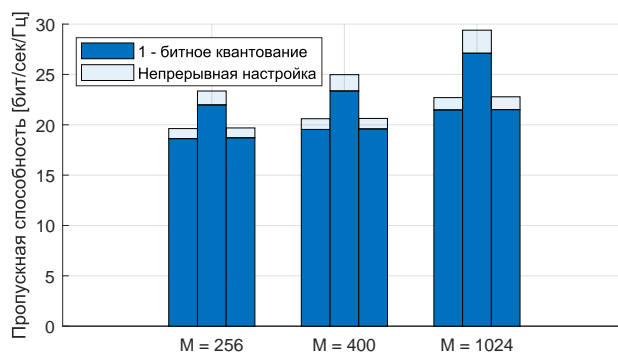


Рис. 5: Зависимость пропускной способности системы от частоты.

На рис. 5 изображены пропускные способности системы с RIS разного размера при трех различных частотах при использовании 1-битного округления и при непрерывной настройке. Для каждого M вычислялась пропускная способность при трёх частотах: f_0 , $f_0 - \Delta f$, $f_0 + \Delta f$. Можно видеть, что точность как 1-битного округления, так и непрерывной настройки снижается на одинаковую величину при рассмотрении обеих границ полосы. Это

связано с тем, что на точность настройки влияет только алгоритм настройки, в то время как затухание сигнала на всей полосе примерно одинаково.

Рассмотрим гистограмму для $M = 1024$. Снижение пропускной способности на границах полосы, связанное с тем, что производится настройка по центральной частоте, составляет примерно 5 бит/сек/Гц для $M = 1024$. В то же время применение округления вносит снижение в 1.5 бит/сек/Гц. Таким образом, снижение пропускной способности системы, связанное с округлением, ниже по сравнению с эффектом, вызванным настройкой по центральной частоте. Для меньшего числа элементов RIS M эффект, вызванный сменой частоты, становится менее выделенным относительно эффекта, вызванного округлением, что объясняется менее точным формированием луча от RIS меньших размеров. При уменьшении ширины полосы $2\Delta f$ эффект от смены частоты будет уменьшаться. Из данных результатов следует, что рассматриваемый метод округления является применимым в полосе частот 100 МГц и меньше, что очень важно при использовании технологии OFDM.

5 Заключение

В данной работе на базе платформы имитационного моделирования был детально исследован метод округления непрерывного решения задачи настройки RIS. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения метода округления в реальных системах передачи данных. Также, был рассмотрен вопрос стабильности рассматриваемого метода округления фаз элементов RIS при изменении частоты. Показано, что в полосе 100 МГц изменение настройки, связанное с округлением, имеет меньший вклад в снижение пропускной способности по сравнению с эффектом, вызванным настройкой по центральной частоте при передаче на границах полосы.

Список литературы

1. Wu Qingqing, Zhang Rui. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network // IEEE Communications Magazine. — 2019. — Vol. 58, no. 1. — P. 106–112.
2. Zhang Shuowen, Zhang Rui. Capacity characterization for intelligent reflecting surface aided MIMO communication // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 2020. — Vol. 38, no. 8. — P. 1823–1838.
3. Weighted sum-rate maximization for intelligent reflecting surface enhanced wireless networks / Guo Huayan, Liang Ying-Chang, Chen Jie, and Larsson Erik G // 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) / IEEE. — 2019. — P. 1–6.
4. Wu Qingqing, Zhang Rui. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming // IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2019. — Vol. 18, no. 11. — P. 5394–5409.
5. Schrijver Alexander. Theory of linear and integer programming. — John Wiley & Sons, 1998.

6. Wu Qingqing, Zhang Rui. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts // IEEE Transactions on Communications. — 2019. — Vol. 68, no. 3. — P. 1838–1851.
7. Yigit Zehra, Basar Ertugrul, Altunbas Ibrahim. Low complexity adaptation for reconfigurable intelligent surface-based MIMO systems // IEEE Communications Letters. — 2020. — Vol. 24, no. 12. — P. 2946–2950.
8. Low-complexity channel estimation and passive beamforming for RIS-assisted MIMO systems relying on discrete phase shifts / An Jiancheng, Xu Chao, Gan Lu, and Hanzo Lajos // IEEE Transactions on Communications. — 2021. — Vol. 70, no. 2. — P. 1245–1260.
9. Practical Modeling and Beamforming for Intelligent Reflecting Surface Aided Wideband Systems / Cai Wenhao, Li Hongyu, Li Ming, and Liu Qian // IEEE Communications Letters. — 2020. — Vol. 24, no. 7. — P. 1568–1571.
10. Intelligent reflecting surface enhanced wideband MIMO-OFDM communications: From practical model to reflection optimization / Li Hongyu, Cai Wenhao, Liu Yang, Li Ming, Liu Qian, and Wu Qingqing // IEEE Transactions on Communications. — 2021. — Vol. 69, no. 7. — P. 4807–4820.
11. Basar Ertugrul, Yildirim Ibrahim. SimRIS channel simulator for reconfigurable intelligent surface-empowered communication systems // 2020 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM) / IEEE. — 2020. — P. 1–6.
12. Telatar Emre. Capacity of multi-antenna Gaussian channels // European transactions on telecommunications. — 1999. — Vol. 10, no. 6. — P. 585–595.
13. Буртаков И.А. Куреев А.А. Ендовицкий Е.О. Моделирование беспроводных сетей с реконфигурируемой интеллектуальной поверхностью // Сборник трудов 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ. — 2021. — С. 91–92.

Аналитическая модель метода распределенного доступа к каналу в сетях 5G V2X*

А.Д. Отмахов², А.Н. Красилов¹, Д.В. Банков¹
{otmakhov, krasilov, bankov}@wireless.iitp.ru

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Аннотация Спецификации сетей 5G вводят новый метод распределенного доступа к каналу для осуществления прямой передачи данных между пользовательскими устройствами (без участия базовой станции). Примерами сценариев, в которых используется данный метод доступа, являются сети автономных транспортных средств (англ. Vehicle-to-Everything, V2X), обменивающихся данными о их текущем положении и окружении, а также информацией о планируемых маневрах. В данной работе разработана аналитическая модель метода распределенного доступа к каналу в сети 5G V2X, позволяющая оценить вероятность потери пакета. Показывается, что существующие модели значительно уступают разработанной модели в точности из-за того, что они не учитывают возможность неполного пересечения сигналов от разных пользователей по частоте, а также тот факт, что пользователь не может одновременно принимать и передавать сигналы в одном и том же временном слоте.

Ключевые слова: 5G, V2X, аналитическое моделирование, метод доступа к каналу.

1 Введение

Одним из важных сценариев использования технологий сотовой связи являются сети для транспорта, позволяющие обеспечивать связь для автомобилей и объектов транспортной инфраструктуры. Потребность в сетях связи для транспорта интенсивно растет в связи с появлением автономных транспортных средств и с активным внедрением решений для обеспечения безопасности на дорогах. Для работы в таких сценариях консорциум 3rd Generation Partnership Project (3GPP) разрабатывает технологию Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) [1], позволяющую реализовывать сети связи для транспорта на основе технологий LTE Advanced [2] и 5G New Radio [3].

* Исследование выполнено в НИУ ВШЭ за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10158, <https://rscf.ru/project/21-79-10158/>

Одним из способов, которым устройства в сетях C-V2X могут обмениваться данными, является передача сообщений напрямую, без участия базовой станции [3]. Данный способ позволяет снизить задержки на передачу данных и особенно актуален для связи между транспортными средствами (англ.: Vehicle-to-Vehicle communications, V2V), так как многие решения, связанные с управлением транспортными средствами, должны приниматься за ограниченное время. В данной работе рассматривается именно сценарий V2V. Примером случаев, когда в сетях V2V необходимо передавать пакеты с минимальной задержкой, является рассылка оповещений о состоянии окружающей среды (англ.: Decentralized Environmental Notification Message, DENM), которые генерируются при обнаружении опасности на дороге и рассылаются окружающим автомобилям с указанием координаты опасного участка дороги, в ответ на которое получатели могут снизить скорость или перестроиться в соседнюю полосу. Важно также то, что сообщения DENM должны доставляться надежно, так как потеря такого сообщения может привести к серьезным последствиям. В типичных сценариях V2V устройства генерируют от 2 до 100 сообщений в секунду, максимальная задержка не должна превышать 10-25 мс, а пакеты должны доставляться с надежностью 90-99,999% [4]. Конкретные требования определяются приложениями и уровнем автоматизации транспортных средств.

В описываемых сетях V2V передача данных осуществляется без участия базовой станции, а трафик сообщений DENM аperiodический — пользователи генерируют их в случайные моменты времени, связанные с возникновением чрезвычайных ситуаций на дорогах. В связи с этим в сетях C-V2X устройства могут передавать данные в режиме распределенного доступа к каналу, который позволяет им передавать данные почти сразу при их поступлении в случайно выбираемых частотных подканалах.

Метод доступа, используемый устройствами C-V2X, является разновидностью метода «синхронная ALOHA» с множеством подканалов. Как известно, при таком методе доступа вероятность коллизии пакетов достаточно быстро возрастает с ростом нагрузки на сеть, и поэтому важной задачей является определение емкости сети — максимальной нагрузки, при которой можно удовлетворить поставленные требования на задержку и надежность передачи данных.

В данной работе разрабатывается математическая модель сети V2V, в которой используется распределенный доступ к каналу, позволяющая найти вероятность потери пакета (англ.: Packet Loss Ratio, PLR) и, как следствие, емкость сети при заданных ограничениях на PLR и при строгих ограничениях на задержку при передаче данных. При этом показывается, что модели, известные из литературы, имеют большую ошибку в оценке вероятности потери пакета, чем разработанная модель, из-за того, что они пренебрегают тем, что в сетях V2V получатель может находиться в режиме передачи и тем, что пакеты разных пользователей могут пересекаться по частоте только частично.

Дальнейшее изложение построение следующим образом. В разделе 2 приводится описание метода распределенного доступа. В разделе 3 содержится обзор работ, связанных с исследуемым методом доступа. В разделе 4 описывается исследуемый сценарий работы сети. В разделе 5 разрабатывается математическая модель нахождения PLR в зависимости от параметров сценария. В разделе 6 обсуждаются численные результаты. Заключение содержится в разделе 7.

2 Метод распределенного доступа

Пользователи передают пакеты методом множественного доступа с ортогональным частотным разделением (англ.: Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA). Для этого ресурсы канала дискретным образом разделяются по времени и частоте. Во временной области происходит деление на слоты равной длительности. По частоте деление происходит на подканалы равной ширины.

Когда у пользователя появляется в очереди пакет, он может передать его в одном из следующих слотов. Для передачи пользователь использует непрерывный набор подканалов. Положение первого подканала из набора определяется равновероятно среди всех возможных вариантов. Количество требуемых для передачи подканалов определяется размером пакета и используемой Сигнально-Кодовой Конструкцией (СКК). При этом, в первом подканале из выбранного набора передается заголовок пакета, содержащий служебную информацию о пакете и контрольную сумму заголовка. Также у самого пакета есть контрольная сумма, с помощью которой получатель может убедиться в корректном декодировании пакета.

В случае успешной доставки пакета получатель отправляет подтверждение (англ.: acknowledgment, АСК) по специальному служебному каналу для подтверждений. В случае, если получатель декодировал заголовок, но не смог декодировать пакет, получатель отправляет отрицательное подтверждение (англ.: negative АСК, NACK). Стоит отметить, что заголовок всегда кодируется самой надежной СКК, поэтому вероятность его получения намного выше, чем у оставшейся части пакета.

После получения АСК на переданный пакет, пользователь может начать обслуживать новый пакет, если такой имеется в очереди. При получении NACK пользователь делает повторную попытку передачи. В стандарте не специфицируется, через какое время пользователь должен делать повторную попытку передачи в случае получения NACK. Пользователь может совершить повторную попытку через произвольно выбранную отсрочку. Если пользователь не успел доставить пакет в течение заданного ограничения на время доставки, пакет отбрасывается.

3 Обзор литературы

Метод доступа, описанный в разделе 2, является разновидностью метода «синхронная ALOHA» с множеством подканалов. Метод доступа «синхронная ALOHA» с множеством подканалов рассматривается во многих работах, например, в [5] рассматриваются централизованные системы, а в [6] — распределенные. Однако рассматриваемые в данных работах системы имеют важное различие с системой распределенного доступа C-V2X: в сетях C-V2X предполагаемый получатель пакета не может одновременно передавать и принимать сигналы в одном временном слоте. Как показано в разделе 6, игнорирование данного факта приводит к недооценке PLR.

Существует множество исследований распределенного доступа к каналу в сетях C-V2X, например, [2], в которых данный метод доступа исследуется экспериментальным способом или при помощи имитационного моделирования, однако в них не разрабатываются математические модели, позволяющие найти вероятность потери пакета при заданных параметрах трафика или емкость сети при заданном ограничении на PLR, из-за чего результаты исследования [2] нельзя использовать для настройки сети при конкретных условиях.

Задача, наиболее похожая на решаемую в данном исследовании, рассматривается в [7], однако в данной работе был допущен ряд неточностей и пренебрежений, которые, как показано в разделе 6, искажают оценку PLR. Как и в упомянутых ранее работах в работе [7] не учитывается, что предполагаемый получатель пакета не может одновременно передавать и принимать сигналы в одном частотном диапазоне. Также в работе [7] предполагается, что пакеты от разных пользователей могут пересекаться по частоте только целиком, хотя согласно спецификации возможны и частичные пересечения. В данной работе разработана математическая модель, лишенная данных недостатков.

4 Исследуемый сценарий

Рассмотрим следующий сценарий работы сети V2V. Сеть состоит из N ($N \gg 1$) пользователей, расположенных на прямой так, что расстояние между соседними устройствами имеет экспоненциальное распределение с параметром ϕ . На пользователях генерируется поток пакетов одинакового размера. Пользователь генерирует новый пакет через случайное время, имеющее экспоненциальное распределение с параметром λ , после получения ACK/NACK на предыдущий пакет. После генерации пакета пользователь передает его в ближайшем слоте. В данной работе рассматривается случай, когда ограничения на время доставки пакета достаточно для совершения одной попытки передачи. Расширение работы на случай нескольких попыток передачи является предметом дальнейших исследований.

Пакеты передаются одноадресно, а адресат пакета выбирается равновероятно из множества устройств, находящихся на расстоянии, не превышающем R , причем $R \gg \phi^{-1}$. Предполагается, что подтверждения ACK/NACK

всегда доставляются успешно. Для передачи пакета требуется некоторое количество подканалов M , зависящее от СКК, а весь канал состоит из B подканалов. Все устройства используют одинаковые СКК и передают сигналы с одинаковой мощностью S . Пользователь успешно принимает пакет, если среднее геометрическое значение $SINR$ в подканалах, в которых передавался пакет, превосходит заданный порог T , определяемый используемой СКК. При этом заголовок пакета всегда декодируется успешно, так как он кодируется с использованием самой надежной СКК.

5 Математическая модель

В данном разделе описывается математическая модель распределенного доступа к каналу. В модели делается два основных предположения. Согласно сценарию, количество пользователей в сети велико, а расстояние между соседними пользователями имеет экспоненциальное распределение. Поэтому первым предположением модели является то, что такая система приближается потоком Пуассона на прямой с параметром ϕ . Вторым предположением модели является то, что генерируемый пользователями трафик имеет малую интенсивность. Пользователь генерирует пакет в среднем через λ^{-1} после получения ACK/NACK на предыдущий пакет, поэтому данное предположение выражается как $\lambda \ll \frac{1}{D\Delta t}$, где Δt — длительность слота, а D — число слотов, в течение которых пользователь ожидает получение ACK/NACK.

Произвольным образом выберем пользователя (далее *пользователь TX*), передающего пакет другому пользователю (далее *получатель*) в рассматриваемом слоте. Пакет декодируется успешно при выполнении двух условий. Во-первых, в момент передачи кадра от пользователя TX к получателю, получатель не должен находиться в режиме передачи. Это связано с тем, что получатель не сможет услышать чужой сигнал на фоне своего, имеющего значительно большую мощность. Во-вторых, $SINR$ в подканалах, в которых передается пакет, должен быть выше заданного порога. Поэтому вероятность потери пакета равна

$$PLR = 1 - P_{idle} \cdot P_s, \quad (1)$$

где P_{idle} — вероятность того, что получатель не передает пакет, а P_s — вероятность того, что значение $SINR$ для пакета окажется выше порога T для успешного приема.

Дальнейшее описание модели построено следующим образом. В разделе 5.1 находится P_{idle} . Далее в разделе 5.2 приводится общее выражение для P_s . Для вычисления этой вероятности требуется вероятность приема пакета при условии, что он пересекается с пакетом другого пользователя, которая находится в разделе 5.3. Окончательные выражения для P_s и емкости сети приводятся в разделе 5.4.

5.1 Вероятность того, что получатель не передает пакет

Найдем P_{idle} . Получатель осуществит передачу в рассматриваемом слоте, если он не ожидает подтверждения на ранее отправленный пакет и во время предыдущего слота был сгенерирован пакет. Обозначим $p = 1 - e^{-\lambda\Delta t}$ — вероятность генерации пакета за слот. Из предположения о том, что пользователи генерируют трафик малой интенсивности следует, что получатель чаще всего находится в состоянии без пакета на передачу. Если в течение $D + 1$ слотов, предшествующих предыдущему слоту, получатель сгенерирует пакет, то он передаст пакет в следующем после генерации слоте, и в текущем слоте не сможет передавать новый пакет, так как будет ждать или принимать подтверждение. Таким образом, для того, чтобы пользователь в текущем слоте передавал пакет, он должен сгенерировать пакет в предыдущем слоте и не генерировать их в предшествующих $D + 1$ слотах — это происходит с вероятностью $p(1 - p)^{D+1}$. Тогда вероятность того, что получатель не передает пакет в текущем слоте равна:

$$P_{idle} = 1 - p(1 - p)^{D+1}. \quad (2)$$

5.2 Вероятность успешной передачи

Далее найдем вероятность успешной передачи при условии, что получатель сам не передает пакет. Будем считать, что пакет пользователя ТХ может быть не принят, если интерферирующие пользователи находятся на расстоянии, не превышающем r_{max} . Вероятность успешной передачи равна

$$P_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n \sum_{k=0}^n G_{n,k} \cdot Q_k, \quad (3)$$

где H_n — вероятность того, что n пользователей помимо пользователя ТХ оказались в круге радиуса r_{max} , в центре которого находится получатель, $G_{n,k}$ — вероятность того, что за предыдущий слот у k пользователей из n появились пакеты на передачу, а Q_k — вероятность того, что при одновременной передаче с другими k пользователями пакет рассматриваемого пользователя будет принят успешно.

Пользователи расположены на прямой согласно потоку Пуассона, поэтому

$$H_n = \frac{(2\phi r_{max})^n}{n!} e^{-2\phi r_{max}}.$$

Чтобы найти $G_{n,k}$, воспользуемся предположением о малой интенсивности трафика и тем, что пакеты появляются через время, распределенное экспоненциально с параметром λ :

$$G_{n,k} = C_n^k \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k}.$$

При нахождении Q_k предположим, что влияние интерференции пакетов от других пользователей на пакет пользователя ТХ можно считать независимым для каждого пользователя. Тогда

$$Q_k = Q_1^k.$$

Вероятность Q_1 того, что при одновременной передаче с одним интерферирующим пользователем пакет пользователя ТХ будет принят успешно, равна

$$Q_1 = \sum_{m=0}^M P_{M,m} \cdot q_{M,m}, \quad (4)$$

где $P_{M,m}$ — вероятность того, что два пакета, занимающие по M подканалов, пересекутся в m подканалах, а $q_{M,m}$ — вероятность того, что при таком пересечении интерференция не помешает правильному приему пакета от пользователя ТХ. Эти величины будут найдены в разделе 5.3.

Подставим введенные нами величины в (3):

$$P_s = e^{-2\phi r_{max}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2\phi r_{max})^n}{n!} \sum_{k=0}^n C_n^k \cdot (Q_1 p)^k \cdot (1-p)^{n-k}.$$

Теперь воспользуемся тем, что сумма по k — разложение бинома Ньютона:

$$P_s = e^{-2\phi r_{max}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2\phi r_{max})^n}{n!} \cdot [1 - p(1 - Q_1)]^n.$$

Получившаяся сумма по n является рядом Маклорена для экспоненты:

$$P_s = e^{-2\phi r_{max}(1-Q_1)p}. \quad (5)$$

5.3 Вероятность приема пакета при пересечении с другим пакетом

Найдем величины, требуемые для вычисления Q_1 . Сначала найдем $P_{M,m}$. Пусть $M < B/2$ и $0 \leq m \leq M$. Всего существует $(B+1-M)^2$ вариантов размещения двух пакетов шириной M подканалов по B подканалам. При этом, в $(B+2-2M) \cdot (B+1-2M)$ вариантах пакеты не пересекаются, в $2(B+m+1-2M)$ вариантах пакеты пересекаются по m , $0 < m < M$ подканалам, и в $B+1-M$ вариантах пакеты пересекаются полностью. В итоге получим

$$P_{M,m} = \begin{cases} \frac{(B+2-2M) \cdot (B+1-2M)}{(B+1-M)^2}, & m = 0, \\ \frac{2(B+m+1-2M)}{(B+1-M)^2}, & 0 < m < M, \\ \frac{1}{B+1-M}, & m = M. \end{cases} \quad (6)$$

Теперь найдем $q_{M,m}$. Рассмотрим ситуацию, когда пакет пользователя TX и пакет интерферирующего пользователя пересекаются в m подканалах. Для успешной доставки пакета требуется, чтобы среднее геометрическое от $SINR$ в подканалах, в которых передается пакет, превышало допустимый порог T . В тех подканалах, в которых передача пользователя TX не пересекается с пакетом интерферирующего пользователя, $SINR$ равен

$$SINR_0 = \frac{\frac{S}{M} \cdot l(r_{TX})}{W},$$

где W — мощность теплового шума в одном подканале, S — излучаемая пользователем мощность сигнала, r_{TX} — расстояние от пользователя TX до получателя, $l(r) = (Ar)^{-\beta}$, где $A > 0$ и $\beta \geq 2$ — функция потерь на распространение сигнала.

В подканалах, в которых передача пользователя TX пересекается с пакетом интерферирующего пользователя, $SINR$ равен

$$SINR_1 = \frac{\frac{S}{M} \cdot l(r_{TX})}{\frac{S}{M} \cdot l(r_{int}) + W},$$

где r_{int} — расстояние от интерферирующего пользователя до получателя.

Пусть T измеряется в децибелах, тогда условие на успешный прием пакета шириной M подканалов при пересечении с другим пакетом в m подканалах записывается как

$$\frac{(M - m) \cdot 10 \log_{10}(SINR_0) + m \cdot 10 \log_{10}(SINR_1)}{M} \geq T.$$

Подставив значения $SINR$, получим

$$M \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{M} l(r_{TX}) \right) - m \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{M} l(r_{int}) + W \right) - (M - m) \cdot \log_{10}(W) \geq \frac{TM}{10}.$$

Подставим функцию $l(r)$ и найдем минимальное допустимое для успешной передачи расстояние от получателя до интерферирующего пользователя как функцию r_{TX} :

$$r_{min}(r_{TX}) = \frac{1}{A} \cdot \left[\left(\frac{S}{MW} \right)^{\frac{M}{m}-1} \cdot \frac{(Ar_{TX})^{-\frac{\beta M}{m}}}{10^{\frac{TM}{10m}}} - \frac{MW}{S} \right]^{-\frac{1}{\beta}}.$$

Воспользуемся тем, что, по свойству процесса Пуассона, r_{TX} имеет равномерное распределение на интервале $[0, R]$, а r_{int} имеет равномерное распределение на интервале $[0, r_{max}]$, и найдем вероятность $q_{M,m}$ того, что интерферирующее устройство находится на допустимом расстоянии:

$$q_{M,m} = \mathcal{P}(r_{int} > r_{min}) = 1 - \mathcal{P}(r_{int} \leq r_{min}) = 1 - \int_0^R \frac{r_{min}(r_{TX})}{r_{max}} \cdot \frac{dr_{TX}}{R}.$$

После подстановки получаем:

$$q_{M,m} = 1 - \frac{1}{AR \cdot r_{max}} \int_0^R \left[\left(\frac{S}{MW} \right)^{\frac{M}{m}-1} \cdot \frac{(Ar_{TX})^{-\frac{\beta M}{m}}}{10^{\frac{TM}{10m}}} - \frac{MW}{S} \right]^{-\frac{1}{\beta}} dr_{TX}.$$

Стоит отметить, что эта формула корректна только для $m \neq 0$. При $m = 0$, то есть при отсутствии пересечений у пакетов, ограничений на расположение интерферирующего устройства нет: $q_{M,0} = 1$.

5.4 Итоговое выражение для вероятности успешной передачи и емкости сети

Подставив $P_{M,m}$ и $q_{M,m}$ в (4) и Q_1 в (5), получим:

$$P_s = \exp \left\{ -\frac{2\phi p}{AR} \sum_{m=1}^M P_{M,m} \int_0^R \left[\frac{S^{\frac{M}{m}-1} (Ar_{TX})^{-\frac{\beta M}{m}}}{(MW)^{\frac{M}{m}-1} 10^{\frac{TM}{10m}}} - \frac{MW}{S} \right]^{-\frac{1}{\beta}} dr_{TX} \right\}. \quad (7)$$

Заметим, что значение r_{max} сократилось.

Подставив (2), (6) и (7) в уравнение (1), получим искомую вероятность потери пакета. Вероятность потери пакета можно рассматривать как функцию от параметра трафика λ . Пусть PLR^* — заданное ограничение на PLR. Тогда емкость сети определяется как

$$C = \max \{ \lambda : PLR(\lambda) \leq PLR^* \}.$$

6 Результаты моделирования

Для рассматриваемого сценария была реализована имитационная модель работы сети в среде имитационного моделирования ns-3 [8]. Данная модель используется для валидации разработанной математической модели. Для моделирования использовались параметры, указанные в таблице 1.

Таблица 1: Параметры моделирования.

Параметр	Значение
Число пользователей (при имитационном моделировании)	1000
Число поднесущих в подканале	120
Ширина поднесущей	30 кГц
Входной коэффициент шума	9 дБ
Начальная мощность сигнала S	23 дБм
Длительность временного слота Δt	500 мкс
Количество слотов для получения ACK/NACK D	4
Среднее расстояние между пользователями ϕ^{-1}	10 м
Общее число подканалов B	10
Размер пакета	100 байт
Число подканалов для передачи пакета M , СКК 0	4
Число подканалов для передачи пакета M , СКК 1	3
Число подканалов для передачи пакета M , СКК 2	2
Число подканалов для передачи пакета M , СКК 5	1
Порог $SINR$ для успешного приема T , СКК 0	-1,03 дБ
Порог $SINR$ для успешного приема T , СКК 1	-0,46 дБ
Порог $SINR$ для успешного приема T , СКК 2	0,24 дБ
Порог $SINR$ для успешного приема T , СКК 5	2,86 дБ
Коэффициент затухания A	46,6777 дБм
Показатель затухания β	3

Проведем валидацию разработанной математической модели. На рис. 1 показана зависимость PLR от параметра λ для математической и имитационной моделей при разных СКК. Выбор СКК обусловлен тем, что при данных значениях СКК (0, 1, 2, 5) для передачи пакета требуется разное количество подканалов (4, 3, 2 и 1 соответственно). График показывает, что результаты, полученные с помощью разработанной математической модели, близки к результатам, полученным при помощи имитационной модели: относительная погрешность PLR не превышает 10% для каждой СКК.

Из рис. 1 видно, что PLR снижается при повышении СКК, приводящем к уменьшению числа подканалов для передачи пакета M . Это достигается за счет того, что при снижении M , во-первых, уменьшается вероятность пересечения пакетов от разных пользователей, и во-вторых, увеличивается плотность мощности передаваемого сигнала: мощность делится между подканалами равномерно. В результате вероятность приема пакета повышается даже несмотря на то, что от перехода от меньшей СКК к большей увеличивается порог $SINR$ для успешного приема. Так, при интенсивности трафика на пользователе 1 пакет в секунду, увеличение СКК с 1 до 5 позволяет снизить PLR примерно в 2 раза. Также, если зафиксировать ограничение на максимальный PLR на уровне 10^{-3} получаем, что увеличение СКК позволяет примерно в 2 раза повысить емкость сети.

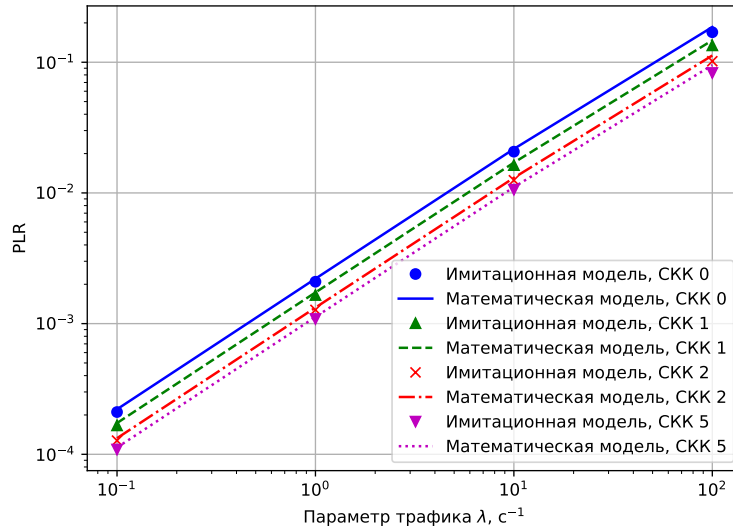


Рис. 1: Зависимость вероятности потери пакета от параметра трафика λ , $R = 100$ м.

Рассмотрим также зависимость PLR от максимального расстояния R до получателя для математической и имитационной моделей, показанную на рис. 2. Полученные результаты также показывают высокую точность модели: относительная погрешность меньше 10% для каждой СКК. Результаты моделирования показывают, что PLR растет с увеличением R , что связано с тем, что при большем расстоянии от передающего пользователя до получателя падает мощность сигнала на получателе и растет вероятность того, что $SINR$ на получателе окажется ниже порога для успешного приема. Как и на рис. 1, PLR снижается при увеличении СКК. В результате, при фиксированном ограничении на максимальный PLR на уровне 10^{-3} получаем, что увеличив СКК от 0 до 5, можно повысить максимальную дальность связи почти в 2 раза.

Рассмотрим важные факторы, влияющие на точность модели. Для этого сравним три разные модели:

- имитационную модель;
- разработанную модель (далее *модель 1*);
- модель, в которой не учитывается то, что получатель может находиться в режиме передачи (в такой модели считается, что $P_{idle} = 1$ в (1)) (далее *модель 2*);

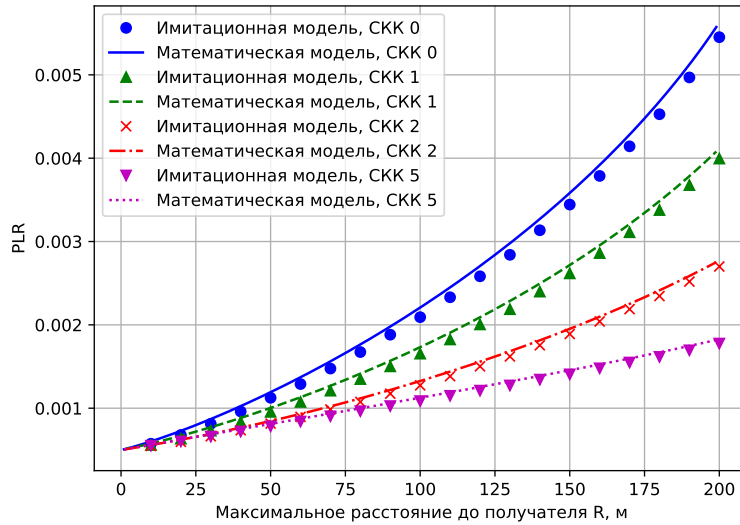


Рис. 2: Зависимость вероятности потери пакета от максимального расстояния до получателя R , $\lambda = 1 \text{ с}^{-1}$.

– модель, представленную в работе [7], в ней предполагается, что пакеты от разных пользователей могут пересекаться только целиком, подканалы разделяются на группы размера M и трафик от разных пользователей равномерно распределяется по этим группам (далее *модель 3*).

Отметим, что в модели 3, как и в модели 2, не учитывается то, что получатель может находиться в режиме передачи.

На рис. 3 показана зависимость вероятности потери пакета от максимального расстояния R до получателя для рассматриваемых моделей, а на рис. 4 показана относительная ошибка моделей относительно имитационной. Относительная ошибка моделей 2 и 3 достигает наибольших значений при устремлении расстояния к нулю. Данный факт связан с тем, что в обеих моделях не учитывается то, что получатель даже в отсутствие интерференции может не принять пакет из-за того, что сам находится в режиме передачи: в результате PLR для моделей 2 и 3 стремится к нулю, а для модели 1 — к $1 - P_{idle}$. При увеличении R погрешность модели 2 относительно модели 1 уменьшается, потому что P_{idle} не зависит от R , но вероятность $1 - P_s$ того, что пакет не будет принят из-за интерференции, растет, и в результате растет абсолютное значение PLR. По этой же причине относительная ошибка модели 3 относительно модели 1 сначала уменьшается при увеличении R , но достигает минимума при $R \approx 100$ м и дальше растет. Рост погрешности объ-

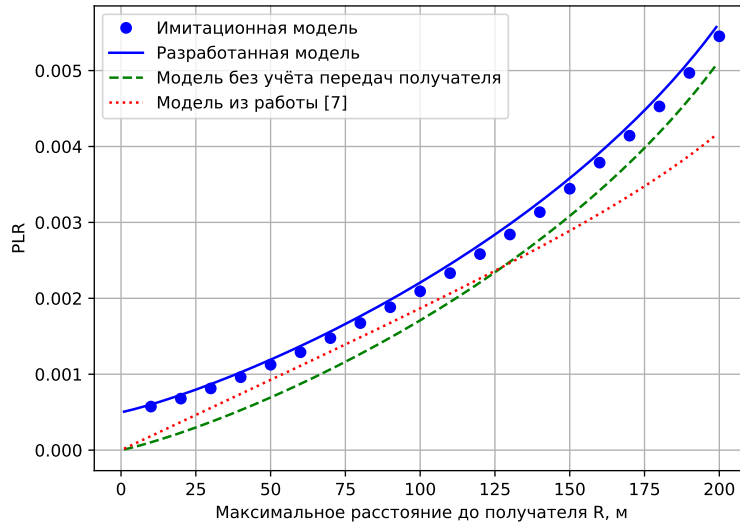


Рис. 3: Зависимость вероятности потери пакета от максимального расстояния до получателя для разных моделей, СКК 0, $\lambda = 1 \text{ с}^{-1}$.

ясняется тем, что в модели 3 рассматриваются только полные пересечения пакетов и предполагается равномерное распределение трафика пользователей по подканалам, из-за чего недооценивается вероятность того, что найдется интерферирующий пользователь, передача которого может помешать приему пакета, причем эта вероятность растет при увеличении R .

Отметим, что ошибка модели 1 относительно имитационной меньше 10%, а ошибка моделей 2 и 3 при всех рассматриваемых значениях R выше, чем у модели 1. Наиболее существенная ошибка моделей 2 и 3 относительно имитационной модели и модели 1 достигается при расстояниях меньше 50 м, которые можно считать наиболее актуальными для связи V2V с точки зрения вероятности успешной передачи и возможности использования более быстрых СКК.

Рассмотрим зависимость емкости сети от среднего расстояния между соседними пользователями ϕ^{-1} , показанную на рис. 5. Значение емкости получено для ограничения на вероятность потери пакета $PLR^* = 10^{-3}$, типичного для сценария V2V. Емкость сети растет с увеличением ϕ^{-1} , что связано с тем, что в окрестности получателя оказывается меньше потенциальных интерферирующих пользователей. Так, при увеличении ϕ^{-1} с 10 м до 50 м, емкость сети возрастает почти в 2 раза. Также емкость сети уве-

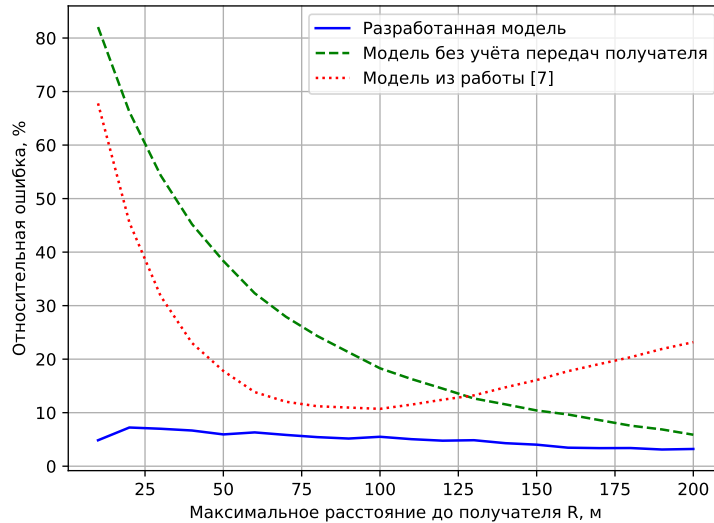


Рис. 4: Зависимость относительной погрешности PLR относительно имитационной модели от максимального расстояния до получателя для разных моделей, СКК 0, $\lambda = 1 \text{ c}^{-1}$.

личивается при переходе к более быстрым СКК: при переходе от СКК 0 к СКК 5 емкость сети можно увеличить в 1,5–2 раза.

Полученные зависимости показывают, как разработанную математическую модель можно использовать на практике. При известной плотности пользователей на дороге и известной интенсивности трафика, модель позволяет определить максимальное расстояние до получателя R , при котором PLR не превысит заданное ограничение PLR^* . Для этого надо найти R , при котором параметр трафика λ будет равен емкости сети. Знание R позволяет, например, определить максимальную протяженности колонны автономных транспортных средств, обменивающихся данным с заданной надежностью.

7 Заключение

В данной работе разработана математическая модель сети C-V2X, в которой пользователи обмениваются данными с использованием метода распределенного доступа к каналу. Разработанная модель позволяет при заданных интенсивности трафика, среднем расстоянии между пользователями, параметрах канала и СКК найти вероятность потери пакета, а при заданном ограничении на вероятность потери пакета – найти емкость сети. Сравнение

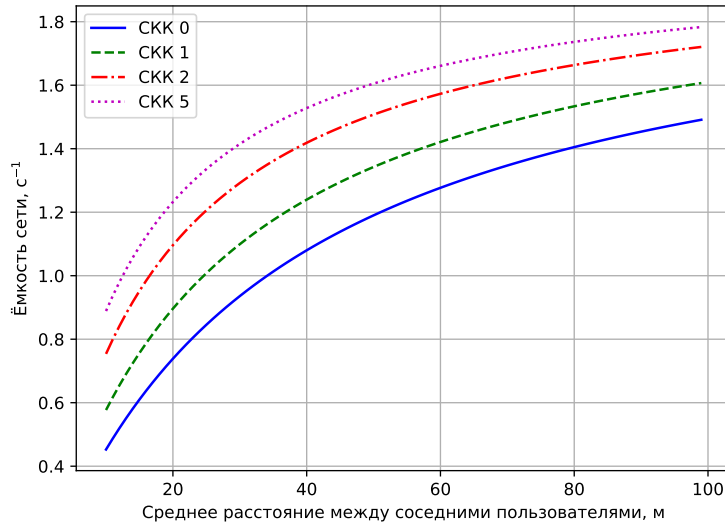


Рис. 5: Зависимость емкости сети от среднего расстояния между соседними пользователями ϕ^{-1} , $R = 100$ м, $PLR^* = 10^{-3}$.

результатов, полученных с помощью математической модели и с помощью имитационного моделирования в среде ns-3 показало, что разработанная модель имеет достаточно высокую точность (погрешность меньше 10%). При этом было показано, что модели, известные из литературы, в которых пренебрегается тем, что получатель может находиться в режиме передачи и тем, что пакеты разных пользователей могут пересекаться не полностью, имеют большую ошибку в оценке вероятности потери пакета. Разработанная в данной работе модель лишена таких недостатков.

Результаты моделирования показали, что вероятность потери пакета снижается, а емкость сети увеличивается при переходе от робастных СКК к более быстрым, если при этом уменьшается количество подканалов, необходимых для передачи пакета. Также вероятность потери пакетов снижается, а емкость сети увеличивается при уменьшении максимального расстояния от передающего пользователя до получателя.

В дальнейшем планируется расширить разработанную модель на случай, когда пользователи используют разные СКК, а также на случай, когда пользователи могут сделать несколько попыток передачи пакета. Также планируется расширить модель для случая, когда при неудачной попытке передачи пользователи могут зарезервировать часть канальных ресурсов

для повторной передачи и, тем самым, повысить вероятность успеха при повторной передаче.

Список литературы

1. Alalewi Ahmad, Dayoub Iyad, Cherkaoui Soumaya. On 5G-V2X use cases and enabling technologies: A comprehensive survey // *IEEE Access*. — 2021. — Vol. 9. — P. 107710–107737.
2. Molina-Masegosa Rafael, Gozalvez Javier. LTE-V for sidelink 5G V2X vehicular communications: A new 5G technology for short-range vehicle-to-everything communications // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. — 2017. — Vol. 12, no. 4. — P. 30–39.
3. 3GPP NR sidelink transmissions toward 5G V2X / Lien Shao-Yu, Deng Der-Jiunn, Lin Chun-Cheng, Tsai Hua-Lung, Chen Tao, Guo Chao, and Cheng Shin-Ming // *IEEE Access*. — 2020. — Vol. 8. — P. 35368–35382.
4. A tutorial on 5G NR V2X communications / Garcia Mario H Castañeda, Molina-Galan Alejandro, Boban Mate, Gozalvez Javier, Coll-Perales Baldomero, Şahin Taylan, and Kousaridas Apostolos // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2021. — Vol. 23, no. 3. — P. 1972–2026.
5. WLC22-4: Efficient request mechanism usage in IEEE 802.16 / Vinel Alexey, Zhang Ying, Ni Qiang, and Lyakhov Andrey // *IEEE Globecom 2006 / IEEE*. — 2006. — P. 1–5.
6. Baccelli François, Blaszczyszyn Bartłomiej, Muhlethaler Paul. An Aloha protocol for multihop mobile wireless networks // *IEEE transactions on information theory*. — 2006. — Vol. 52, no. 2. — P. 421–436.
7. C. Campolo A. Molinaro A. O. Berthet, Vinel A. On Latency and Reliability of Road Hazard Warnings Over the Cellular V2X Sidelink Interface // *IEEE Communications Letters*. — 2019. — Nov. — Vol. 23, no. 11. — P. 2135–2138.
8. Network simulator 3 (NS-3). — Access mode: <https://www.nsnam.org/>.

Экспериментальная оценка эффективности использования неортогонального множественного доступа в восходящем канале в сетях Wi-Fi *

Р.А. Злобин^{1,2}, А.А. Куреев²
{zlobin, kureev}@wireless.iitp.ru

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва

²Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

Аннотация В связи с ростом числа подключенных устройств к сети и непрерывным повышением требований к скоростям передачи данных в сетях Wi-Fi необходимы новые методы передачи данных. Также сети Wi-Fi часто состоят из устройств разных поколений, поэтому важным является поддержка обратной совместимости. Одним из методов, удовлетворяющий этим потребностям, является метод неортогонального множественного доступа (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), повышающий спектральную эффективность беспроводных сетей за счет разделения сигналов разных устройств по мощностям. Работа посвящена экспериментальному исследованию технологии NOMA в восходящем канале (англ.: Uplink Non-Orthogonal Multiple Access, UL-NOMA) в сетях Wi-Fi. При помощи прототипа экспериментально подтверждена эффективность последовательного подавления помех, а результаты имитационного моделирования, откалиброванные по экспериментальным данным, обосновывают целесообразность использования UL-NOMA в сетях Wi-Fi.

Ключевые слова: неортогональный множественный доступ, Wi-Fi.

1 Введение

В связи с ростом числа подключенных устройств к сети и непрерывным повышением требований к скорости передачи данных в сетях Wi-Fi необходимы новые методы передачи данных. Одним из них таких методов является метод неортогонального множественного доступа (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), повышающий спектральную эффективность беспроводных сетей. Используя этот метод, возможно передавать и принимать

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00846, <https://rscf.ru/project/21-19-00846/>

сразу несколько сигналов в одном и том же частотно-временном ресурсе, используя разность в мощностях этих сигналов для их разделения.

Неортогональный множественный доступ в восходящем канале (англ.: Uplink Non-Orthogonal Multiple Access, UL-NOMA) является перспективным для использования в сотовых сетях нового поколения вследствие повышения пропускной способности и спектральной плотности по сравнению с классическими методами ортогонального множественного доступа [1,2,3]. Поэтому актуальным является исследование возможности использования данного метода применительно к сетям Wi-Fi. На данный момент технология UL-NOMA в сетях Wi-Fi изучена с использованием только методов имитационного и аналитического моделирования [4,5,6]. Однако, для более точной оценки эффективности необходимо также проводить экспериментальные исследования, так как в теоретических исследованиях используются допущения при моделировании технологии NOMA. Существуют работы, посвященные экспериментальному исследованию NOMA в нисходящем канале [7,8], однако этих результатов недостаточно для UL-NOMA, из-за необходимости проведения независимой оценки каналов и коррекции фазы по пилотным поднесущим для разных пользователей в восходящем канале.

В нашей предыдущей работе [9] предложен формат NOMA-кадра, поддерживающий обратную совместимость с существующими устройствами, а также разработан UL-NOMA приемник с параллельным подавлением помех (англ.: Parallel Constellation Demapping, PCD). В данной работе в прототипе UL-NOMA приемника реализовано последовательное подавление помех (англ.: Successive Interference Cancellation, SIC) для улучшения помехоустойчивости при приеме NOMA-кадра. Целью данной работы является экспериментальное сравнение помехоустойчивости методов SIC и PCD, а также демонстрация прироста пропускной способности сети при применении UL-NOMA для обоснования целесообразности использования UL-NOMA в сетях Wi-Fi.

Работа устроена следующим образом. Раздел 2 описывает сценарий использования UL-NOMA в сети Wi-Fi. В разделе 3 рассматриваются методы SIC и PCD. В разделе 4 описана постановка эксперимента и сравнение помехоустойчивости SIC и PCD. В разделе 5 демонстрируется увеличение пропускной способности сети при использовании UL-NOMA по сравнению с множественным доступом с разделением во времени (англ.: Time Division Multiple Access, TDMA). Наконец, раздел 6 завершает работу.

2 Использование UL-NOMA в сетях Wi-Fi

Рассмотрим использование технологии UL-NOMA в Wi-Fi на примере сети, изображенной на рис. 1. Сеть состоит из точки доступа и двух станций, находящихся на разном расстоянии от точки доступа. Назовем станции *ближняя* и *дальняя* в соответствии с их расположением относительно точки доступа. Пусть дальняя станция испытывает большее затухание в канале, чем ближняя станция.

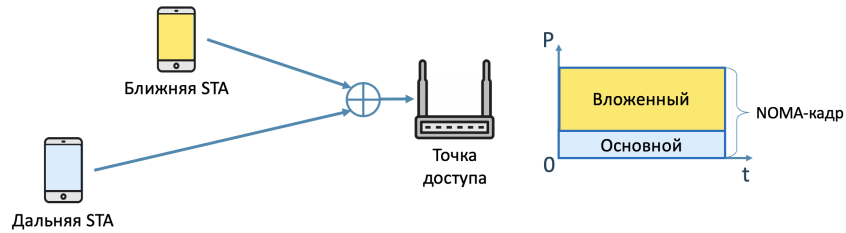


Рис. 1: Пример использования UL-NOMA в Wi-Fi.

В Wi-Fi в основном используется TDMA, при котором в одном частотном канале только одна станция может передавать данные в один момент времени¹. Однако при использовании UL-NOMA станции могут передавать кадры точке доступа в одном частотном диапазоне одновременно.

Организовать передачу с помощью UL-NOMA можно разными способами. Для синхронизации в UL-NOMA можно использовать кадры RTS/CTS, как это сделано в работе [6]. После инициирования передачи от дальней станции кадром RTS и разрешением передачи точкой доступа кадром CTS ближняя станция начинает совместную с дальней станцией передачу кадра с данными в UL-NOMA. Данный способ обладает свойством обратной совместимости со стандартом 802.11a [10]. Если же рассматривать более новые стандарты Wi-Fi, например 802.11ax [11], то для синхронизации можно использовать триггер-кадры.

Кадр, который отправляет дальняя станция, назовем *основным кадром*. Кадр от ближней станции, имеющий большую мощность при приеме на точке доступа, назовем *вложенным кадром*. Считаем, что кадры от обеих станций имеют одинаковую длительность и передаются синхронно на одной частоте. На точку доступа приходит суперпозиция сигналов от станций. Этот суммарный сигнал называется *NOMA-кадром* — в нем сигналы от разных станций можно разделить по мощностям.

Для UL-NOMA передачи в прошлой работе [9] предложен формат NOMA-кадра. В нем основной кадр имеет формат, определенный стандартом 802.11a. Вложенный кадр имеет измененное поле *Legacy Long Training Field (L-LTF)*, которое используется для оценки канала. Также во вложенном кадре используется прореживание пилотных поднесущих по OFDM-символам. Эти изменения позволяют производить независимую оценку каналов и коррекцию фазы по пилотным поднесущим для обоих кадров.

¹ В данной работе не рассматривается использование OFDMA и MIMO ввиду сохранения обратной совместимости с существующими устройствами Wi-Fi.

3 SIC и PCD

Для разделения основного и вложенного кадров при приеме NOMA-кадра следует использовать метод SIC или PCD. На рис. 2 изображена упрощенная схема приемника с использованием метода SIC. После эквализации канала и корректировки фазы для сигнала NOMA-кадра отсчеты в частотной области сохраняются для дальнейшего выделения сигнала основного кадра. Слабый сигнал основного кадра рассматривается как шум, и происходит демодуляция и декодирование сигнала основного кадра. После того как будут получены первые байты вложенного кадра, происходит восстановление изначального сигнала вложенного кадра и его вычитание из общего сигнала NOMA-кадра. Сигнал, полученный после вычитания, есть сигнал основного кадра. Далее, для выделенного сигнала происходит эквализация канала по характеристикам основного кадра, корректировка фазы и, аналогично вложенному кадру, демодуляция и декодирование.

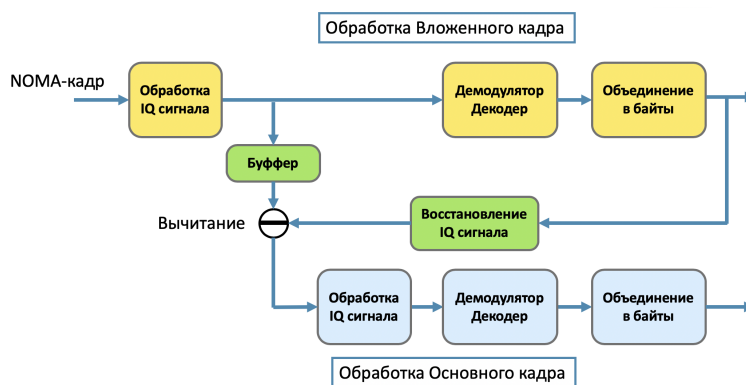


Рис. 2: Блок-схема приемника с последовательным подавлением помех.

Теперь рассмотрим метод PCD, схема приемника с PCD изображена на рис. 3. В данном случае исходный сигнал вложенного кадра определяется с помощью принятия жесткого решения о переданном символе в IQ-области. В зависимости от используемой модуляции во вложенном кадре, IQ-область делится на участки, задающие область определения каждого символа. Если сигнальная точка попадает в определенный участок, то считается, что исходная точка вложенного кадра соответствует этому участку. Сигнальные точки вложенного кадра, определенные таким образом, вычитаются из исходного сигнала и выделяется сигнал основного кадра. Таким образом, при использовании PCD не возникает задержки на декодирование данных вложенного кадра и оба кадра обрабатываются параллельно.

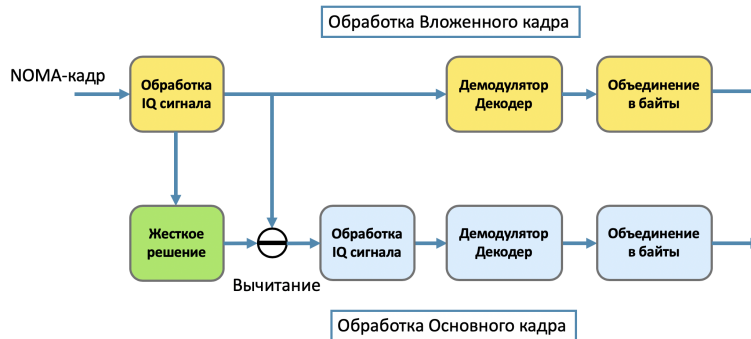


Рис. 3: Блок-схема приемника с параллельным подавлением помех.

Рассмотрим преимущества и недостатки каждого метода. Главным недостатком SIC является задержка перед обработкой основного кадра. Скорость обработки вложенного кадра важна, например, в случае, когда после получения кадра с данными необходимо ответить кадром подтверждения (англ.: Acknowledgment, ACK) через интервал Short Interframe Space (SIFS) равный 16 мкс. Одним из вариантов решения этой проблемы является подготовка кадра ACK заранее и, в случае неуспешного приема основного кадра, изменение значения контрольной суммы в конце кадра ACK на неверную. Поскольку PCD быстро выделяет сигнал основного кадра, то проблемы с задержкой ACK не возникает, кроме того, этот метод проще в реализации. Однако сигнал вложенного кадра, восстановленный с помощью жесткого решения, может быть определен с большим количеством ошибок. Это существенно в случае, когда отношение мощностей кадров таково, что сигнальные созвездия основного кадра могут выходить за границы своего участка в жестком решении. При использовании SIC сигнал вложенного кадра будет восстановлен точнее. Для того чтобы определить, какой метод использовать для UL-NOMA в Wi-Fi, необходимо провести сравнение помехоустойчивости методов PCD и SIC, что описано далее в разделе 4.

4 Сравнение помехоустойчивости SIC и PCD

4.1 Описание эксперимента

Дополнительно к прототипу приемника с реализацией PCD из работы [9], разработанного на базе программно определяемого радиоустройства (англ.: Universal Software Radio Peripheral, USRP), создан приемник с реализацией SIC. С помощью прототипа проведено экспериментальное исследование влияния разности мощностей на способность приемника успешно декодировать переданные в UL-NOMA кадры от дальней и от ближней станций. Такой подход позволит оценить насколько передача вложенного кадра в

UL-NOMA влияет на прием основного кадра. Экспериментальная установка состоит из двух USRP-2954R: одно устройство используется в качестве передатчика, другое — в качестве приемника. Для представления синхронной передачи от дальней и ближней станций с передатчика отправляются основной и вложенный кадры одинаковой длительности с двух антенн на разных мощностях.

Размер полезных данных в основном кадре выбран 1500 байт. Сигнал вложенного кадра имеет большую мощность при приеме, чем сигнал основного кадра. Для передачи основного кадра выбрана СКК 3 (индекс определяется стандартом 802.11a). Для вложенного кадра — СКК 3, СКК 4. Так как при передаче в UL-NOMA используются кадры одинаковой длительности, то размер данных во вложенном кадре определяется таким образом, чтобы длительности обоих кадров совпадали. Соответственно, при использовании СКК 3 размер полезных данных вложенного кадра также равен 1500 байт, а для СКК 4 — 2020 байт. Сигналы передаются на частоте 5,16 ГГц, ширина канала 20 МГц. Параметры эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры эксперимента.

Частота несущей	5,16 ГГц
Ширина канала	20 МГц
СКК, основной кадр	СКК 3
СКК, вложенный кадр	СКК 3, СКК 4
Размер полезных данных в основном кадре	1500 байт
Размер полезных данных во вложенном кадре	СКК 3: 1500 байт СКК 4: 2020 байт

4.2 Выбор параметров передачи основного кадра

Чтобы выбрать мощность передачи основного кадра для проведения эксперимента, первоначально получены зависимости доли принятых кадров от отношения сигнал/шум (англ.: Signal-to-Noise Ratio, SNR) для кадров размера 1500 байт при стандартной передаче (без UL-NOMA). SNR изменяется за счет переключения мощности на передатчике. Результаты показаны на рис. 4. Для передачи основного кадра выбрана СКК 3, использующая QPSK. Выбрано значение $SNR = 11,0$ дБ, это минимальное значение, при котором доля принятых кадров равнялась 1,0. При данных параметрах использование СКК 4 и выше неэффективно из-за значительного уменьшения доли принятых кадров.

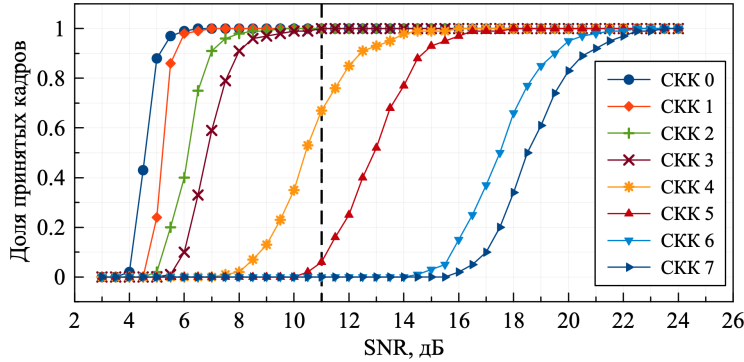


Рис. 4: Зависимость доли принятых кадров от SNR для стандартной передачи.

4.3 Анализ приема NOMA-кадров

В экспериментах измеряется доля принятых основных и вложенных кадров в зависимости от отношения мощностей вложенного кадра к мощности основного кадра и шума (англ.: Signal to Interference + Noise Ratio, SINR) при использовании методов SIC и PCD. При обработке NOMA-кадра на приемнике сигнал основного кадра искажается сильнее, чем при стандартной передаче. Это может уменьшить долю принятых основных кадров, так как было выбрано граничное значение SNR для основных кадров, когда доля принятых кадров — 1,0. Однако при незначительном ухудшении приема основных кадров среднее количество данных при передаче в UL-NOMA будет больше, чем при стандартной передаче.

Введем обозначение для комбинации СКК основного и вложенного кадров: СКК $N \times$ СКК M значит, что для передачи основного кадра выбрана СКК с индексом N , а для передачи вложенного кадра СКК с индексом M .

В первом эксперименте выбрана комбинация СКК основного и вложенного кадра СКК 3 \times СКК 3 (QPSK \times QPSK). На рис. 5 изображена зависимость доли принятых основных и вложенных кадров от SINR вложенного кадра. На графике видно ухудшение приема вложенного и основного кадра при значениях SINR вложенного кадра ниже 8 дБ при использовании как SIC, так и PCD. При таком соотношении мощностей кадров происходит пересечение соседних сигнальных созвездий основного кадра, что сильно ухудшает декодирование и основного, и вложенного кадра. В этом случае используя SIC приемник точнее восстанавливает сигнал вложенного кадра, по сравнению с PCD, поэтому при низких значениях SINR результаты для PCD оказываются хуже.

При увеличении значения SINR выше 8 дБ пересечения сигнальных созвездий не происходит, и доля принятых кадров увеличивается. Из-за этого результаты для методов PCD и SIC практически совпадают. В этом экспе-

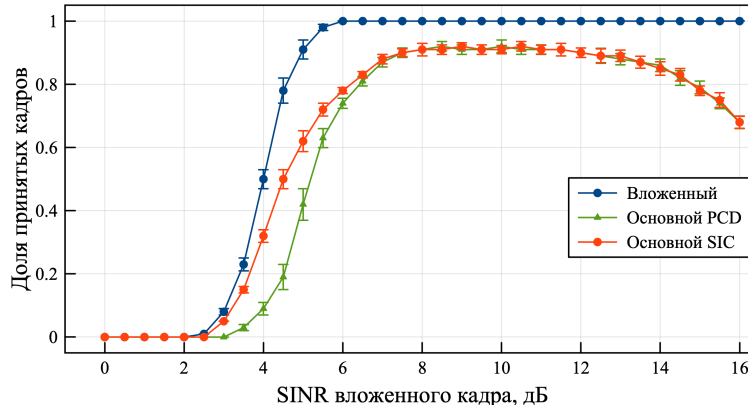


Рис. 5: Прием NOMA-кадра для комбинации СКК 3 × СКК 3.

рименте в области значений SINR от 8,0 дБ до 11,0 дБ вероятность приема вложенного кадра равна примерно 0,91.

При дальнейшем увеличении мощности наблюдается спад вероятности успешного приема основного кадра. Это объясняется тем, что при корректировке фазы общего NOMA-кадра по прореженным пилотным поднесущим, флуктуации фазы, небольшие с точки зрения сигнала вложенного кадра, значительно искажают сигнал основного кадра после его выделения из общего сигнала. Чем больше разность в мощностях кадров, тем сильнее влияние этого эффекта, поэтому падает доля принятых основных кадров.

Во втором эксперименте выбрана комбинация СКК основного и вложенного кадра СКК 3 × СКК 4 (QPSK × 16-QAM) и на рис. 6 изображена зависимость доли принятых основных и вложенных кадров от SINR вложенного кадра для данной комбинации.

В этом эксперименте наблюдаются те же эффекты, что и в первом эксперименте, однако, при комбинации СКК 3 × СКК 4 нагляднее видно, что помехоустойчивость метода SIC выше по сравнению с PCD. Это связано с тем, что точки сигнального созвездия вложенного кадра при использовании 16-QAM находятся ближе, чем при использовании QPSK. В этом эксперименте лучшее значение доли принятых основных кадров соответствует 0,88 и достигается при SINR = 12,0 дБ.

При этом, для значения SINR = 12,0 дБ при комбинации СКК 3 × СКК 3 доля принятых основных кадров составляет 0,90. При данных параметрах системы использование комбинации СКК 3 × СКК 4 для передачи в UL-NOMA может повысить пропускную способность для ближней станции, незначительно повлияв на прием кадров дальней станции.

Для первых двух экспериментов доля принятых основных кадров не достигает 1,0, как это получено при стандартной передаче основного кадра. Хотя при SNR = 11,0 дБ для основного кадра вероятность приема при стан-

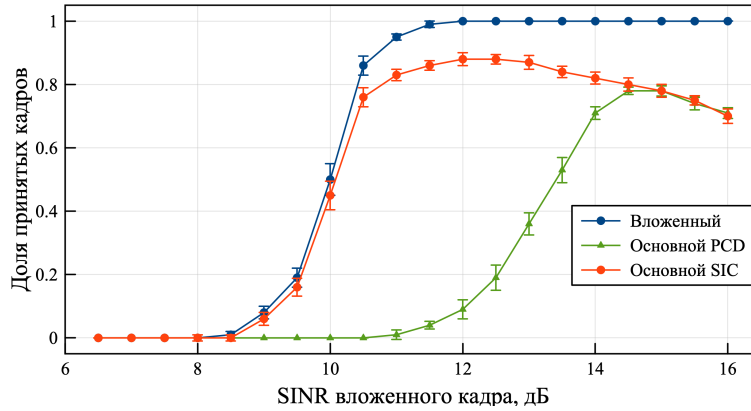


Рис. 6: Прием NOMA-кадра для комбинации СКК 3 × СКК 4.

дартной передаче равняется 1,0, при передаче в UL-NOMA сигнал основного кадра сильнее искажается после выделения из общего сигнала NOMA-кадра. Из-за этого вероятность приема основного кадра уменьшается.

В описанных экспериментах доля принятых основных кадров меньше 1,0, но, увеличив мощность передачи сигнала основных кадров, можно добиться, чтобы и основной, и вложенный кадры принимались с вероятностью 1,0. Однако при использовании большей мощности передачи для основных кадров увеличится значение SNR, и при стандартной передаче эффективнее использовать СКК более высокого индекса.

5 Сравнение UL-NOMA и TDMA

5.1 Описание модели

Для оценки эффективности разработанного приемника и формата кадров в сетях Wi-Fi сравним пропускную способность сети с использованием UL-NOMA с пропускной способностью сети, в которой используется TDMA, как описано в стандарте 802.11a. В данном разделе для сравнения UL-NOMA и TDMA используется имитационная модель, откалиброванная по результатам эксперимента, полученным в разделе 4.

Рассмотрена сеть, как в разделе 2, состоящая из точки доступа и двух станций: ближней и дальней, каждая из которых отправляет данные на точку доступа. Ближняя станция работает согласно стандарту 802.11a.

Сценарии с TDMA и UL-NOMA изображены на рис. 7. Пусть в сценарии с TDMA для доступа к каналу используется EDCA с механизмом RTS/CTS. Когда канал свободен и одна из станций досчитала свой счетчик отсрочки, она передает кадр RTS. Точка доступа, получив этот кадр, отправляет обратно кадр CTS для подтверждения передачи. Далее, после получения этого

кадра станция отправляет кадр с данными, и после успешной отправки точка доступа отправляет станции кадр ACK.

Механизм RTS/CTS используется для уменьшения длительности коллизии. При этом, если точка доступа отправила кадр CTS, а станция его приняла, то коллизии не произошло. При дальнейшей передаче кадр с данными может быть не принят вследствие выбора СКК с вероятностью приема меньше 1,0. В этом случае конкурентное окно не увеличивается, так как кадр данных был потерян не из-за коллизии. Подробное описание механизма отсрочки описано в стандарте [12].

Для организации передачи UL-NOMA воспользуемся подходом, предложенным в работе [6]. Считаем, что в данном сценарии при инициировании передачи от дальней станции кадром RTS и разрешения на передачу точкой доступа кадром CTS оба кадра также получает ближняя станция, и далее происходит совместная передача в UL-NOMA основного и вложенного кадров одинаковой длины. После успешного приема NOMA-кадра точка доступа отправляет ACK с использованием DL-NOMA [7]. При этом, если основной кадр не будет принят, а вложенный будет, то точка доступа отправит ACK только ближней станции.

Также отдельно рассматриваются случаи использования только UL-NOMA передач и передач UL-NOMA совместно с TDMA, когда помимо передач в UL-NOMA происходят стандартные передачи ближней станции. При использовании UL-NOMA совместно с TDMA ближней станции не обязательно ожидать передачу дальней станции для отправки своих данных.

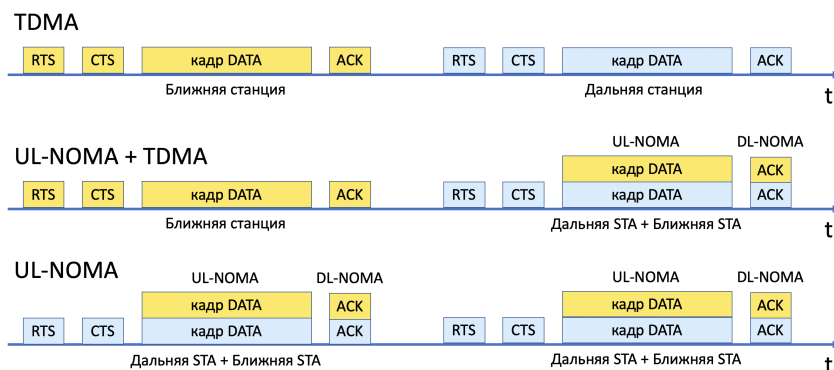


Рис. 7: Последовательность передач при использовании TDMA и UL-NOMA.

Имитационная модель для анализа описанной сети реализована в среде ns-3 [13]. Считаем, что точка доступа и обе станции находятся в зоне радиовидимости друг друга. Станции посылают кадры с фиксированным

размером полезных данных 1500 байт. Все служебные кадры от станций и точки доступа (RTS, CTS, ACK) передаются на минимальной СКК 0 с вероятностью 1,0.

Используя результаты, полученные в разделе 4, разместим станции так, чтобы для дальней станции $SNR = 11,0$ дБ, а для ближней станции $SNR = 19,0$ дБ.

Выберем СКК для обеих станций, при которых будет достигаться максимальная пропускная способность при стандартной передаче отдельно для каждой станции. Пользуясь графиком на рис. 4, с учетом передач служебных кадров, при $SNR = 11,0$ дБ для стандартной передачи кадров данных эффективнее использовать СКК 3 с вероятностью приема 1,0, а при $SNR = 19,0$ дБ — СКК 5 с вероятностью приема 1,0.

Таким образом, для максимизации пропускной способности для стандартной передачи дальней станции нужно выбрать СКК 3, у которой вероятность приема 1,0. Для стандартной передачи ближней станции выбрана СКК 5 с вероятностью приема 1,0. При передаче в UL-NOMA используется комбинация СКК 3 × СКК 3, при которой вероятность приема вложенного кадра равна 1,0, а основного кадра 0,91 (одинаково для SIC и PCD).

5.2 Численные результаты

В ходе эксперимента измеряется пропускная способность обеих станций, суммарная пропускная способность и среднее геометрическое пропускных способностей дальней и ближней станций для сценариев с использованием TDMA, UL-NOMA совместно с TDMA, только UL-NOMA. Время эксперимента 60 секунд, значения пропускных способностей усредняются по пяти прогонам имитационной модели.

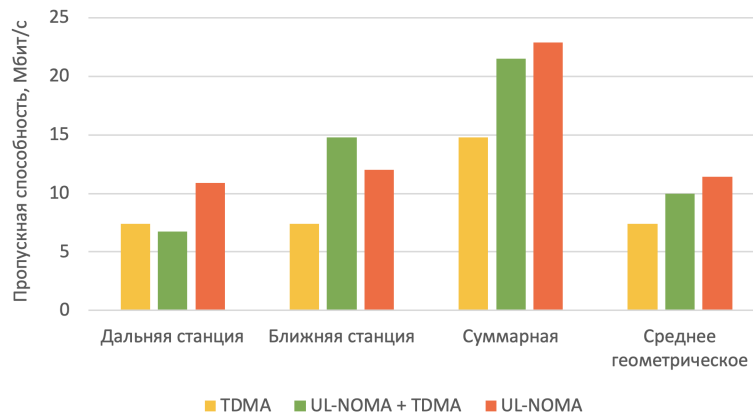


Рис. 8: Сравнение пропускных способностей.

На рис. 8 изображена гистограмма, показывающая пропускные способности для описанной сети при использовании TDMA, UL-NOMA и UL-NOMA совместно с TDMA. Так как вероятность приема основного кадра при передаче в UL-NOMA меньше 1,0, то пропускная способность дальней станции меньше на 9%. При этом совместно с каждой передачей дальней станции передает ближняя станция, и пропускная способность для ближней станции увеличивается в два раза при использовании UL-NOMA совместно с передачей дальней станции. Как можно видеть, суммарная пропускная способность и среднее геометрическое пропускных способностей двух станций увеличиваются при использовании UL-NOMA по сравнению с TDMA. Среднее геометрическое для UL-NOMA выше на 35%, чем для TDMA.

В сценарии, когда каждая передача происходит в UL-NOMA, станции соперничают между собой за использование канала, что увеличивает пропускные способности для обеих станций, их среднее геометрическое увеличивается на 54% по сравнению с TDMA. Таким образом, применение технологии UL-NOMA в сетях Wi-Fi может увеличивать пропускную способность не только устройств с поддержкой UL-NOMA, но и устройств предшествующих поколений.

6 Заключение

В данной работе исследовалась эффективность использования технологии UL-NOMA в сетях Wi-Fi. Экспериментально показано, что метод SIC более помехоустойчив по сравнению с PCF и увеличивает область канальных условий для использования UL-NOMA. Преимущество SIC наиболее выражено для комбинации СКК 3 × СКК 4. Используя экспериментальные результаты, продемонстрировано увеличение пропускной способности сети при использовании UL-NOMA по сравнению с TDMA. Прирост среднего геометрического пропускных способностей составил 35% при использовании UL-NOMA совместно с TDMA и 54% при использовании только UL-NOMA. Выводы, полученные из данного исследования, демонстрируют целесообразность использования технологии UL-NOMA для сетей Wi-Fi.

Список литературы

1. Liu Yuanwei, Qin Zhijin, Elkashlan Maged et al. Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond. — 2017.
2. Uplink non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks / Mohammed Al-Imari, Pei Xiao, Muhammad Ali Imran, Rahim Tafazolli. — 2014. — P. 781–785.
3. Uplink Nonorthogonal Multiple Access in 5G Systems / Ningbo Zhang, Jing Wang, Guixia Kang, Yang Liu // IEEE Communications Letters. — 2016. — Vol. 20, no. 3. — P. 458–461.
4. Ghazi H.S., Wesolowski Krzysztof. Uplink NOMA scheme for wi-fi applications // International Journal of Electronics and Telecommunications. — 2018. — 01. — Vol. 64. — P. 481–485.

5. Performance Evaluation of Uplink NOMA in Wi-Fi Networks / Grigory Korolev, Aleksey Kureev, Evgeny Khorov, Dmitry Shmelkin. — 2020. — P. 1–5.
6. Enabling Synchronous Uplink NOMA in Wi-Fi Networks / Grigoriy Korolev, Aleksey Kureev, Evgeny Khorov, A. Lyakhov. — 2021. — 11. — P. 1–5.
7. Prototyping and Experimental Study of Non-Orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks / Evgeny Khorov, Aleksey Kureev, Илья Levitsky, Ian F. Akyildiz // IEEE Network. — 2020. — Vol. 34, no. 4. — P. 210–217.
8. Performance Evaluation of Downlink Non-Orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks / Egor Endovitskiy, Aleksey Kureev, Илья Levitsky et al. // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2021. — 12. — Vol. 66. — P. 1485–1490.
9. Р.А. Злобин А.А. Куреев. Прототип приемника UL-NOMA в Wi-Fi // Сборник трудов конференции "Информационные Технологии и Системы (ИТиС) 2021". — 2021.
10. IEEE 802.11a-1999 - IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band. — 1999.
11. IEEE P802.11ax - IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment Enhancements for High Efficiency WLAN. — 2017.
12. IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications // IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016). — 2021. — P. 1–4379.
13. Riley George F., Henderson Thomas R. The ns-3 Network Simulator // Modeling and Tools for Network Simulation / Ed. by Klaus Wehrle, Mesut Güneş, James Gross. — Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010. — P. 15–34. — ISBN: 978-3-642-12331-3.

Уменьшение сложности декодера МПП кодов с параллельным расписанием построенных на базе Information Bottleneck *

Мельников Игнат^{1,2}, Крещук Алексей^{1,3}, Куреев Алексей^{1,3}

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук

² Московский Физико-Технический Институт (Национальный Исследовательский Университет)

³ Высшая Школа Экономики (Национальный Исследовательский Университет)

Аннотация При использовании стандартного алгоритма декодирования кодов с малой плотностью проверок (МПП, англ.: Low-Density Parity-Check, LDPC) можно значительно уменьшить сложность декодирования за счёт хранения предвычисленной суммы всех сообщений в узлах переменных. Декодер Information Bottleneck (IB) значительно снизил пространственную сложность декодирования за счёт снижения разрядности всех сообщений. Для этого прямая сумма заменяется на локально оптимальную дискретную бинарную функцию. При таком подходе уже невозможно использовать предвычисленную сумму всех сообщений для упрощения вычисления суммы всех, кроме выбранного. В данной работе разработан алгоритм построения дискретной бинарной функции, оценивающей искомую величину по общей сумме и выбранному сообщению и максимизирующую взаимную информацию, что по сути является вычитанием, а также исследуется корректирующая способность декодера, использующего построенные дискретные функции.

1 Введение

На данный момент МПП-коды широко используются в современных системах связи благодаря их отличной корректирующей способности и простоте итеративного декодирования. Эти коды обеспечивают корректирующую способность близкую к пределу Шеннона [1].

Одними из самых популярных алгоритмов декодирования являются алгоритмы Обмена Сообщениями (англ. message passing) такие, как: Распространение Доверия (англ.: Belief Propagation, BP) и Min-Sum [1], которые работают с логарифмом отношения правдоподобия (англ.: Log Likelihood Ratio, LLR). Проверочная матрица МПП-кодов может быть представлена графом Таннера, тогда сам процесс обмена сообщениями может быть интерпретирован как пересчет LLR на ребрах графа. Такой класс алгоритмов открывает

* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

дополнительную степень свободы, возможность изменения сложности операций проводимых в узлах.

Дискретная эволюция плотностей позволяет оптимизировать выбор декодера (Discrete Density Evolution)[2]. Наиболее гибким (и современным) подходом к оптимизации декодера является Information Bottleneck (IB). В кодах с малой плотностью проверок на чётность (англ.: low-density parity-check, LDPC)[2] декодеры, реализованные на базе IB, обрабатывают только целые числа без знака и используют только простые таблицы поиска в качестве узловых операций, что делает их гораздо проще и быстрее чем классические декодеры. [3] [4]. В дальнейшем суммой для IB будет называться дискретная бинарная функция определяемая таблицей или таблицами поиска, где слагаемые независимые величины, в свою очередь вычитанием входа для IB - дискретная бинарная функция определяемая таблицей поиска, где одно из слагаемых сумма IB, а другое величина одного из входов суммы. Обычно в каждой итерации декодирования все узлы переменных и впоследствии все проверочные узлы отправляют сообщения всем своим соседним узлам (flooding schedule). Однако алгоритмы Обмена Сообщений требуют суммы без одного значения ребра, что требует пересчета почти всей суммы для каждого ребра отдельно. В литературе не было найдено решение данной проблемы.

В этой статье предложен эффективный метод расчета суммы без одного элемента для узлов переменных. Его суть заключается в хранении суммы в узлах и определение дискретной бинарной функции для вычитания ребра, что позволит существенно уменьшить сложность декодера.

Статья организована следующим образом. Справочная информация об МПП-кодах, их декодировании методом Обмена Сообщений, расписаниях и Information Bottleneck приведена в разделе 2. В разделе 3 предложен алгоритм построения дискретной бинарной функции, оценивающий искомую величину по общей сумме и выбранному сообщению, а также анализ вычитания с теоретико-информационной точки зрения для канала с Аддитивным Белым Гауссовским Шумом (АБГШ, англ.: AWGN - Additive white Gaussian noise). В разделе 4 проведено сравнение работы декодера, использующего метод вычитания, с декодером, использующим стандартный метод, для Параллельного (Flooding) расписания.

2 Описание модели

2.1 Information Bottleneck

IB - это инструмент из области машинного обучения, основная цель которого сохранить как можно больше релевантной информации, содержащейся в наблюдении за случайной величиной, когда применяется сжатие этой переменной с потерями. X - пространство входов в канала, Y - пространство выходов из канала, в дополнение к ним вводится третья переменная T , которая является сжатым представлением Y . Ключевая идея заключается

в том, чтобы сжать $Y \rightarrow T$ и, таким образом, минимизировать взаимную информацию $I(Y; T)$, чтобы сохранить максимально возможную взаимную информацию $I(T; X)$ [3]. Полученная задача оптимизации также называется вариационным принципом ИВ и может быть выражена, как минимизация функционала \mathcal{L} :

$$\mathcal{L}[p(t|y)] = I(T; Y) - \beta I(T; X). \quad (1)$$

Применяемый метод оптимизации - это оптимизация Лагранжа. Обозначим за β множитель Лагранжа, связанный с информационным ограничением на $I(T; X)$. Крайний случай $\beta = 0$ указывает на максимальное сжатие, а $\beta \rightarrow \infty$ означает максимальное сохранение релевантной информации. Оптимизация же декодера происходит разбиением операции проверочного узла на серию частичных операций. Принцип работы рассматриваемого узла проиллюстрирован на рисунке 1. Каждое сложение соответствует частичной операции, которая принимает два целых числа и возвращает одно целое число. Поиск глобального оптимума является затратной по времени операцией,

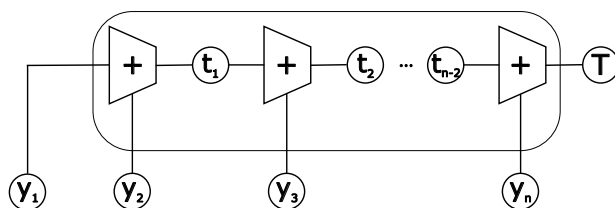


Рис. 1: Иллюстрация разделения работы проверочного узла.

вместо этого обычно ищут локальные экстремумы. Алгоритм Sequential IB направлен на минимизацию функционала (1) с помощью детерминированной кластеризации. Далее пространство событий наблюдаемой случайной величины Y может быть однозначно отсортировано по возрастанию LLR. Определяются затраты на размещение определенного события $y \in Y$ в один из соседних кластеров, далее границы между кластерами двигаются, пока это даёт выигрыш. Подробнее о структуре алгоритма можно узнать в работе [5].

2.2 Распространение Доверия

МПП-коды представляют собой линейные коды с исправлением ошибок, определяемые разреженными проверочными матрицами [1]. В качестве альтернативы они могут быть определены разреженным двудольным неориентированным графом, состоящим из проверочных и узлов переменных. Множества узлов переменных и проверочных узлов будем обозначать соответственно через V и S . МПП-коды могут быть эффективно декодированы с помощью итеративной пересылки сообщений. Эти алгоритмы работают

на двудольном графе представления кода, путем итеративного обновления сообщений между проверочными узлами и узлами переменных вдоль рёбер графа. Несмотря на то, что результаты, полученные в этой статье, могут быть применены к любому алгоритму Обмена Сообщениями, внимание будет акцентировано на алгоритме Распространения Доверия (BP - Belief Propagation) [1], с LLR сообщениями. Мы обозначаем сообщение канала для узла переменной \mathbf{v} с помощью $P_{\mathbf{v}}$, сообщение, отправленное с узла переменной \mathbf{v} на проверочный узел \mathbf{c} как $Q_{\mathbf{v}\mathbf{c}}$, и сообщение, отправленное из \mathbf{c} в \mathbf{v} как $R_{\mathbf{c}\mathbf{v}}$. Алгоритм BP использует следующие правила расчета сообщений:

$$\begin{aligned} Q_{\mathbf{v}\mathbf{c}} &\leftarrow P_{\mathbf{v}} + \sum_{c' \in N(\mathbf{v}) \setminus \mathbf{c}} R_{\mathbf{c}'\mathbf{v}}, \\ R_{\mathbf{c}\mathbf{v}} &\leftarrow -s_{\mathbf{c}\mathbf{v}} \phi \left(\sum_{v' \in N(\mathbf{c}) \setminus \mathbf{v}} \phi(Q_{\mathbf{v}'\mathbf{c}}) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $N(\mathbf{c})$ обозначает множество соседей узла, и

$$\begin{aligned} \phi(x) &= \log \tanh \left(\frac{|x|}{2} \right), \\ s_{\mathbf{c}\mathbf{v}} &= \prod_{v' \in N(\mathbf{c}) \setminus \mathbf{v}} \text{sign}(Q_{\mathbf{v}'\mathbf{c}}). \end{aligned}$$

При вычислении частичной суммы из (2) оптимальнее вычитать из общей суммы одно ребро, чем пересчитывать сумму без одного, особенно для декодеров, построенных на ИВ, где для такой частичной суммы нужно хранить отдельные цепочки таблиц.

2.3 Расписания

Расписание процесса декодирования МПП-кодов определяет порядок пересчёта сообщений. Существует много вариантов расписания, но здесь описан наиболее распространенный и простой, а именно параллельный (Flooding) [6].

Параллельное расписание, пожалуй, самое концептуально простой способ декодирования МПП-кодов. Здесь граф обрабатывается итерационным образом, где каждая итерация включает одновременную отправку всем проверочным узлам, за которой следует одновременная отправка всем узлов переменных.

3 Вычитание для ИВ

3.1 Алгоритм

Как уже упоминалось, в рассматриваемой модели таблицы суммы строятся с помощью алгоритма последовательного ИВ (англ.: Sequential IB, SIB).

Предлагается на время абстрагироваться от самого декодера и рассмотреть суммирующие цепочки таких таблиц, оптимизированных на выходах из АБГШ канала и построить похожим образом таблицы вычитания определенного входа из общей суммы. Тогда общая схема будет выглядеть как показано на Рис. 2:

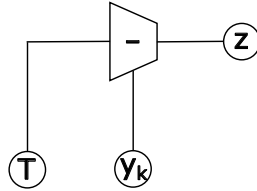


Рис. 2: T – сумма всех выходов АБГШ канала; y_k – k -ый выход АБГШ канала, вычитаемый; z – результат вычитания.

Для построения таблицы вычитания будем также использовать SIB, однако подавать в него другие распределения, а именно $P(T = T_i, y_n = y_{n,i}, x = b_1 = .. = b_{n-1} = b_{n+1} = ..)$, где T - сумма всех входов, b_i - значальные биты, n - индекс вычитаемого входа. Таким образом, это приводит к оптимизации следующих взаимных информаций: Взаимная информация (3) характеризует, сколько информации о невычитаемых битах сохранилось после прохода через канал, а также после расчета общей суммы и вычитания первого входа преобразования, то есть полезная информация, которую нужно сохранить:

$$I(z = f(T, y_1); x = b_2 = .. = b_n) = \sum_{z,x} P(z = z_i, x = b_2 = .. = b_n) \log_2 \frac{P(z = z_i, x = b_2 = .. = b_n)}{P(z = z_i)P(x = b_2 = .. = b_n)}, \quad (3)$$

взаимная информация (4) между величинами независимость которых необходима, которая характеризует информацию, что осталась о первом бите после его вычитания:

$$I(z = f(T, y_1); x = b_1) = \sum_{(y_1, \dots, y_n): z=f(g(y_1, \dots, y_n), y_1)} P(z = z_i, x = b_1) \log_2 \frac{P(z = z_i, x = b_1)}{P(z = z_i)P(x = b_1)}, \quad (4)$$

взаимная информация (5) характеризует информацию о невычитаемых битах после их суммирования, что является полезной информацией в базовом методе. Для простоты будем считать что вычитается первый элемент:

$$I(s = g(y_2, \dots, y_n); x = b_2 = .. = b_n) = \sum_{z,x} P(s = s_i, x = b_2 = .. = b_n) \log_2 \frac{P(s = s_i, x = b_2 = .. = b_n)}{P(s = s_i)P(x = b_2 = .. = b_n)}, \quad (5)$$

где f - функция вычитания второго аргумента из первого, g - функция сложения. В идеальном случае тождественны:

$$f(g(y_1, \dots, y_n), y_1) \equiv g(y_2, \dots, y_n)$$

Близость численных значений (3) и (5) характеризует насколько метод вычитания близок к частичному сложению, а близость (4) к 0 характеризует насколько удачно была удалена информация о вычитаемом объекте.

3.2 Результаты

Так как далее будет рассматриваться регулярная проверочная матрица (3,6) размерами 1536 на 3072, будут представлены результаты для вертикального шага, где суммируются LLR 3-х сообщений, мощности входных распределений $|y_i| = 2^{10} - 1$; для ИВ было выбрано $\beta = \inf$, чтобы сохранялось максимальное количество релевантной информации. Результаты изображены на рис. 3.

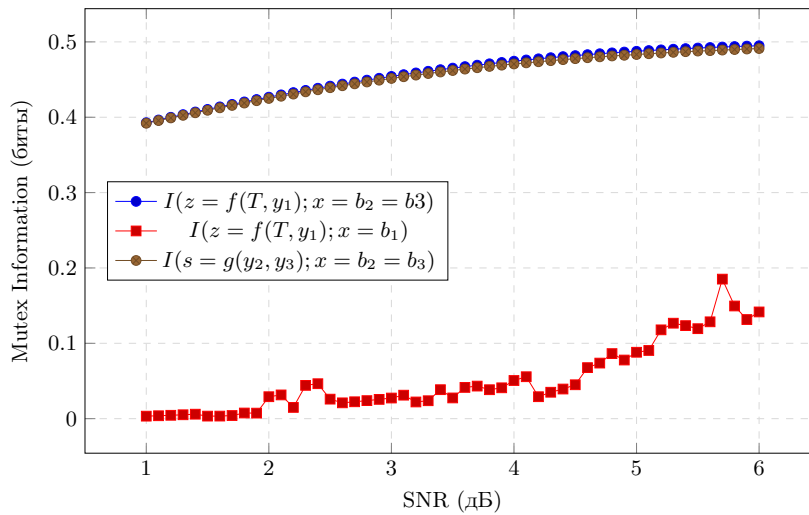


Рис. 3: Поведение взаимных информаций. $I(z = f(T, y_1); x = b_2 = b_3)$ - сколько информации о невычитаемых битах сохранилось после прохода через канал, а также после расчета общей суммы и вычитания первого входа преобразования; $I(z = f(T, y_1); x = b_1)$ - сколько информации осталась о первом бите после его вычитания; $I(s = g(y_2, y_3); x = b_2 = b_3)$ - информация о невычитаемых битах после их суммирования.

На графике видно, что полученная функция дает зависимость очень близкое к сумме без одного в плане сохранения релевантной информации о невычитаемых битах. Лишь при большом расхождении сигнал/шум (ОСШ, англ.: SNR-Signal-to-Noise Ratio) наблюдается их расхождение. Остаточная же информация в начале достаточно близка к нулю, однако с увеличением ОСШ быстро растет. После каждой итерации уровень шума фактически уменьшается, поэтому на первых итерациях предложенный алгоритм должен работать хорошо, а на последних будет оставаться слишком много лишней информации и точность декодера будет падать.

4 Декодер

Как видно из графика на рис. 4, декодер с параллельным расписанием работающий на вычитании работает сравнимо со стандартным, что доказывает жизнеспособность данного метода.

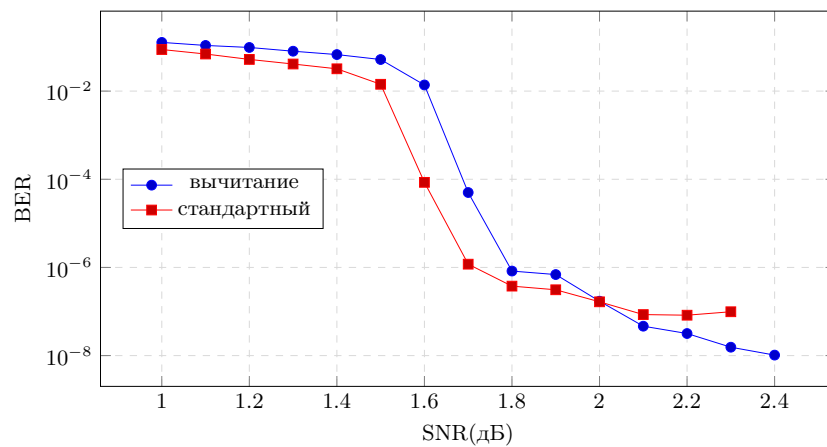


Рис. 4: Сравнение вычитания со стандартным методом.

5 Вывод

В этой статье представлена оптимизация методов Обмена Сообщениями и алгоритм построения дискретной бинарной функции для определения вычитания в узлах переменных, что позволяет снизить сложность декодирования и уменьшить количество затрачиваемой памяти для хранения таблиц поиска. Для проверки построенной функции используется регулярная матрица (3,6), моделирование параллельного декодера на которой показало, что

предложенный метод сравним со стандартным, при этом он эффективнее по сложности и памяти.

Список литературы

- [1] R. Gallager, «Low-density parity-check codes,» *IRE Transactions on Information Theory*, т. 8, № 1, с. 21–28, 1962. DOI: 10.1109/TIT.1962.1057683.
- [2] В. М. Kurkoski, К. Yamaguchi и К. Kobayashi, «Noise thresholds for discrete LDPC decoding mappings,» в *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, New Orleans, LA, USA: IEEE, 2008.
- [3] J. Lewandowsky и G. Bauch, «Information-optimum LDPC decoders based on the information bottleneck method,» *IEEE Access*, т. 6, с. 4054–4071, 2018.
- [4] M. Stark, J. Lewandowsky и G. Bauch, «Information-bottleneck decoding of high-rate irregular LDPC codes for optical communication using message alignment,» en, *Appl. Sci. (Basel)*, т. 8, № 10, с. 1884, окт. 2018.
- [5] J. Lewandowsky и G. Bauch, «Trellis based node operations for LDPC decoders from the Information Bottleneck method,» в *2015 9th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 2015, с. 1–10. DOI: 10.1109/ICSPCS.2015.7391731.
- [6] E. Sharon, S. Litsyn и J. Goldberger, «Efficient Serial Message-Passing Schedules for LDPC Decoding,» *IEEE Transactions on Information Theory*, т. 53, № 11, с. 4076–4091, 2007. DOI: 10.1109/TIT.2007.907507.

Улучшенный метод предварительного доступа к каналу для обслуживания трафика реального времени в сетях Wi-Fi*

К.С. Чемров^{1,2}, Д.В. Банков¹, Е.М. Хоров¹, А.И. Ляхов¹

{chemrov, bankov, khorov, lyakhov}@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Аннотация Важным сценарием использования следующего дополнения к стандарту Wi-Fi, IEEE 802.11be, является обслуживание трафика приложений реального времени. Обеспечить низкие задержки и высокую надежность для обслуживания трафика таких приложений позволяют новые механизмы стандарта, однако они требуют значительного усложнения устройств Wi-Fi. Вместе с этим, в сетях часто присутствуют устаревшие станции, не поддерживающие новые механизмы. Ранее был предложен метод предварительного доступа к каналу для удовлетворения требований к качеству обслуживания трафика приложений реального времени. Данный метод не требует усложнения работы устройств на физическом уровне и позволяет гарантировать низкие задержки даже в сетях с устаревшими устройствами. В данной работе предлагается улучшенный метод предварительного доступа, более эффективный, если трафик реального времени обслуживают несколько станций. Сравнение с методом, основанным на уменьшении длительности передач несрочных кадров, показало, что предложенный в настоящей работе метод обслуживания трафика приложений реального времени может вдвое увеличить эффективность использования канала станциями с нечувствительным к задержке трафиком.

Ключевые слова: приложения реального времени, Wi-Fi, предварительный доступ, низкая задержка, надежность.

1 Введение

В современном мире стремительно растет популярность облачных видеоигр, виртуальной и дополненной реальности, видеостриминговых сервисов и

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00846, <https://rscf.ru/project/21-19-00846/>

других приложений реального времени (англ.: Real-Time Applications, RTA). Отличительной особенностью RTA являются строгие требования к задержке (время доставки не более 1–10 мс) и надежности (доля потерянных кадров менее 10^{-5}) [1]. Многие RTA подразумевают мобильность устройств, поэтому использование проводных сетей часто оказывается затруднительным, что делает актуальной задачу достижения установленных требований в беспроводных сетях.

Значимым примером обслуживания трафика реального времени в беспроводных сетях является сверхнадежная связь с низкой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low Latency Communications, URLLC) [2,3], один из основных сервисов, предоставляемых сотовыми сетями пятого поколения. Другой популярной беспроводной технологией передачи данных является Wi-Fi, что делает актуальной задачу адаптации сетей Wi-Fi для обслуживания трафика RTA. Комитет IEEE 802.11 создал специализированную рабочую группу по RTA (RTA Topic Interest Group), которая классифицировала сценарии, связанные с чувствительным к задержке трафиком и определила требования к качеству его обслуживания [1]. Так, для обслуживания трафика типичных RTA необходимо гарантировать доставку более 99,999% пакетов с задержкой менее 1–10 мс. Обеспечить требуемые задержки в сетях Wi-Fi сложно, потому что устройства Wi-Fi работают в нелицензированном диапазоне частот и используют метод множественного доступа с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). Согласно CSMA/CA станция обязана не прерывать чужую передачу, которая может длиться порядка 5 мс, что затрудняет выполнение ограничений на задержку. Кроме того, коллизии кадров от разных станций дополнительно ухудшают надежность передачи.

Несмотря на описанные выше сложности, обслуживание трафика RTA стало одним из целевых сценариев использования следующего основного дополнения к стандарту Wi-Fi: 802.11be, также известного как Wi-Fi 7 [4,5]. В рамках 802.11be предлагаются методы обслуживания трафика RTA, основанные на составлении расписания передач пакетов и на координировании точкой доступа того, как станции получают доступ к каналу. Первый подход ненадежен, так как другие станции, не поддерживающие новые возможности, могут не учитывать расписание. Второй подход требует, чтобы станция заранее сообщала точке доступа о наличии данных на передачу, что вносит дополнительную задержку. Поэтому актуальной задачей является исследование простых и обратно совместимых методов обслуживания трафика RTA в сетях Wi-Fi. Во-первых, такие методы не должны усложнять физический уровень станций, генерирующих трафик RTA (далее *RTA-станции*). Во-вторых, методы должны позволить сократить задержки даже для сетей, в которых работают устаревшие станции, генерирующие не чувствительный к задержке трафик (далее *обычные станции*).

В настоящей работе рассматриваются предложенные ранее методы, основанные на изменении параметров доступа к каналу и предварительном доступе к каналу (англ.: Preliminary Channel Access, PCA) [6]. Основным

вкладом статьи является улучшенный метод PCA (Smart PCA), который в сценариях со множеством RTA-станций позволяет при заданном ограничении на квантиль задержки для RTA-станций повысить эффективность использования канала обычными станциями. С помощью имитационного моделирования проводится сравнение надежности и задержек передачи кадров от RTA-станций, а также эффективности работы устройств, не чувствительных к задержке. Сравнение позволяет определить, при каких параметрах RTA-трафика и требованиях к качеству его обслуживания целесообразно использовать предложенный метод.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. Раздел 2 содержит краткое описание стандартного метода доступа в сетях Wi-Fi. В разделе 3 приведены существующие в литературе способы улучшения качества обслуживания трафика RTA в сетях Wi-Fi. В разделе 4 описываются исследуемые методы обслуживания трафика RTA, в том числе новый метод Smart PCA, предложенный в данной работе. Разделы 5 и 6 содержат полученные численные результаты и заключение статьи соответственно.

2 Доступ к каналу в сетях Wi-Fi

Современные сети Wi-Fi используют метод случайного доступа к каналу EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access), который работает следующим образом. Каждая станция имеет очередь из ожидающих передачи кадров. Если новый кадр поступает в очередь, когда канал занят, станция инициализирует счетчик отсрочки случайным целым числом, равномерно распределенным на $[0, W_r - 1]$, где W_r — это размер конкурентного окна после r совершенных попыток передачи. После каждой неудачной попытки размер окна удваивается, пока не достигнет максимального значения W_{max} . Пакет будет отброшен, если количество неудачных попыток достигнет предельного числа R :

$$W_r = \begin{cases} W_{min}, & r = 0; \\ \min\{2W_{r-1}, W_{max}\}, & 0 < r < R. \end{cases}$$

Станция замораживает счетчик, когда канал становится занятым. Если канал освобождается и остается свободным в течение времени AIFS (англ.: Arbitration Interframe Space), станция размораживает счетчик и уменьшает его на единицу. Дальше станция уменьшает счетчик отсрочки на единицу каждый раз, когда канал свободен в течение времени T_e . Станция отправляет кадр, если счетчик равен нулю и наступает очередной момент уменьшения счетчика. Если новый кадр поступил в пустую очередь, когда канал был свободен в течение времени AIFS и счетчик отсрочки после предыдущей передачи обнулится, то станция сразу передает кадр. В случае успешного приема принимающая станция отправляет кадр подтверждения ACK через время SIFS (англ.: Short Interframe Space). Передающая станция считает передачу неуспешной, если она не получила кадр ACK в течение времени AckTimeout с момента окончания своей передачи.

В EDCA определены четыре категории доступа: Voice (голосовой поток), Video (видеопоток), Best Effort (обычный трафик) и Background (фоновый трафик). Для разных категорий станция поддерживает отдельные очереди кадров с разными параметрами доступа к каналу. Параметры W_{min} и W_{max} определяют минимальный и максимальный размер конкурентного окна, соответственно. Параметр $AIFS_N$ определяет длину интервала $AIFS = SIFS + T_e \cdot AIFS_N$ и для станций, не являющихся точкой доступа, может принимать целые значения от 2 до 15. Последним параметром является TXOP Limit, который устанавливает максимальное время, на которое станция может занимать канал. В стандарте установлены значения параметров по умолчанию, но точка доступа может их менять.

Стандарт определяет механизм RTS/CTS, который работает следующим образом. Чтобы начать процедуру передачи данных, станция передает кадр RTS (англ.: Request-to-Send). Затем принимающая станция отвечает кадром CTS (англ.: Clear-to-Send), получив который, станция начинает передачу данных. Хотя механизм RTS/CTS увеличивает накладные расходы, он может быть эффективным, когда станции передают длинные кадры: сокращение длительности коллизий может снизить задержки и увеличить пропускную способность сети. Если длина кадра превышает параметр RTS Threshold, то станции следует использовать механизм RTS/CTS.

Еще одна цель использования RTS/CTS — установить виртуальную занятость канала. Многие кадры Wi-Fi, в том числе RTS и CTS, содержат поле Duration/ID, в котором указано, как долго канал будет занят после передачи этого кадра. Станции, успешно прочитавшие это поле, взводят счетчик NAV (англ.: Network Allocation Vector) на указанное время, и считают канал занятым до тех пор, пока счетчик не обнулится.

3 Обзор литературы

Решения по обслуживанию трафика RTA в сетях Wi-Fi изучаются в рабочей группе IEEE 802.11 и в научных работах. В дополнении 802.11ax в Wi-Fi была введена технология ортогонального множественного доступа с частотным разделением (англ. Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA). Она позволяет точке доступа выделять разные поднесущие одного канала нескольким станциям для одновременного приема и передачи данных. Решение по обслуживанию RTA-трафика, основанное на OFDMA, было исследовано в [7] и представлено в RTA TIG (англ.: RTA Topic Interest Group). Стоит отметить, что для целенаправленного выделения частотных ресурсов в OFDMA точке доступа нужно знать, когда у станции есть данные. В этом случае дополнительные задержки будут связаны с передачей информации о появлении кадров в очереди. Точка доступа также может оставлять часть канала для случайного доступа, чтобы станция могла начать попытку передачи, как только у нее появится кадр. При этом станции фактически передают данные согласно методу доступа ALOHA, эффектив-

ность которого значительно снижается при большом числе конкурирующих станций.

Также в стандарте 802.11ax определен механизм Quiet Time Period, который позволяет станциям запрашивать у точки доступа интервалы времени, в течение которых другим станциям будет запрещено получать доступ к каналу. В работе [8] этот механизм рассматривается как один из способов реализовать периодические резервирования для обслуживания трафика приложений реального времени. Однако механизм Quiet Time Period является опциональным, и присутствие в сети не поддерживающих его станций не позволит гарантировать низкие задержки. Вдобавок, в случае нескольких пересекающихся сетей Wi-Fi дополнительно потребуется центральный координатор, который должен распределять канальное время между сетями.

Другой подход к обслуживанию трафика реального времени предложен в [9]. Предлагается ввести отдельную категорию доступа для RTA-трафика и использовать дополнительный радиоинтерфейс для работы в служебном канале. RTA-устройство отправляет в нем сигнал занятости при появлении кадров в очереди. Все устройства должны прослушивать служебный канал и, получив данный сигнал, обязаны немедленно прекратить передачу неприоритетных кадров. Однако гарантировать низкие задержки нельзя, если в сети присутствуют станции, не поддерживающие такой механизм.

В Wi-Fi 7 появится ряд нововведений, которые описаны в [5], а их применение для обслуживания чувствительного к задержке трафика рассматривается в [10]. Стандарт определяет механизм r-TWT (англ.: restricted target wake time), позволяющий резервировать канальные ресурсы для обеспечения низкой задержки для предсказуемого и чувствительного к задержкам трафика. Однако, механизм может быть ненадежным, если в сети присутствуют устаревшие устройства, не поддерживающие r-TWT и имеющие низкую точность часов. Другим механизмом, потенциально способным обеспечить обслуживание трафика RTA, является многоканальный доступ. Авторы [11] предлагают метод, в рамках которого станции получают доступ одновременно к нескольким частотным каналам и передают в канале, к которому доступ был получен раньше всех. Такое решение может снизить задержку доступа к каналу. В работах [12–14] авторы также исследуют потенциал многоканального доступа для уменьшения задержек. Но стоит отметить, что все исследуемые в этих работах методы требуют усложнения RTA-устройств, в частности, наличия хотя бы одного дополнительного интерфейса для доступа к беспроводной среде.

В литературе рассматриваются и более простые способы снижения задержек. Например, авторы [15] предлагают ввести новую категорию доступа EDCA для трафика, чувствительного к задержке. Параметры этой категории должны гарантировать победу RTA-станций в конкуренции с обычными станциями. В [16] для уменьшения времени доступа к каналу предлагается заранее начинать отсчет отсрочки RTA-станциями, ожидающими появле-

ния кадра. Однако приведенные подходы не позволяют снизить задержку, связанную с ожиданием окончания чужой неприоритетной передачи.

В работе [6] предложен метод предварительного доступа к каналу PCA. Если трафик предсказуемый, то станция может заранее начать доступ к каналу с кадром RTS, который в случае успешной передачи резервирует канал так, чтобы на момент появления у станции RTA-кадра в очереди, канал был свободен. В работе также рассматривается уменьшение TXOP Limit для трафика, не чувствительного к задержке, в качестве альтернативного метода снижения задержки, связанной с ожиданием окончания чужой передачи. Было показано, что в случае невысокой интенсивности RTA-трафика метод PCA эффективнее, чем ограничение TXOP Limit. Однако, исследование было проведено только в сценарии с одной RTA-станцией в сети. При увеличении числа таких станций задержка может значительно увеличиться из-за конкуренции между ними и ожидания окончания резервирования другой RTA-станции.

Таким образом, многие существующие методы обслуживания трафика RTA в сетях Wi-Fi либо требуют более сложного устройства станций на физическом уровне, либо не будут надежно работать в сетях с устаревшими устройствами. При этом, подходы, устраняющие эти недостатки, сравнивались только в сценариях, ограниченных одной RTA-станцией в сети.

В настоящей работе ставится задача разработать улучшение метода PCA, позволяющее повысить эффективность использования канала обычными станциями при заданном ограничении на квантиль задержки для RTA-станций. Улучшенный метод не должен усложнять физический уровень RTA-станции и должен быть работоспособным, если другие станции в сети не поддерживают новые стандарты Wi-Fi. Также ставится задача сравнить разработанное улучшение с предложенными ранее методами, и определить параметры трафика, при которых улучшение эффективнее использовать.

4 Исследуемые методы обслуживания RTA-трафика

Рассмотрим сеть Wi-Fi, состоящую из точки доступа, RTA-станций и обычных станций. Пусть все станции, не являющиеся точкой доступа, генерируют восходящий поток данных. В таком случае можно выделить следующие компоненты задержки передачи RTA-кадра: ожидание окончания занятости канала, конкуренция с обычными и RTA-станциями, передача самого кадра с данными и получение подтверждения. Если по сравнению с обычным трафиком интенсивность RTA-трафика невысокая и длительность RTA-кадра небольшая, то основной вклад в задержку дает конкуренция с обычными станциями и ожидание окончания их передач. Чтобы максимально снизить компоненту задержки, связанную с конкуренцией за доступ к каналу с обычными станциями, будем устанавливать EDCA-параметры для категорий доступа, соответствующих RTA-станциям ([RTA]) и обычным станциям ([non-RTA]) следующим образом. Минимальный и максимальный размер конку-

рентного окна должен быть не больше минимальной разницы $AIFSN$:

$$W_{min}[RTA] \leq W_{max}[RTA] \leq \min\{AIFSN[non-RTA] - AIFSN[RTA]\}.$$

Такие параметры гарантируют победу RTA-станций в конкуренции за доступ к каналу с обычными.

Далее рассмотрим три метода, которые уменьшают компоненту задержки, связанную с ожиданием окончания передачи обычной станции.

4.1 Уменьшение TXOP Limit (Tuned EDCA)

Первый рассматриваемый метод (Tuned EDCA) подразумевает уменьшение TXOP Limit для категории доступа, соответствующей обычным станциям. Стоит обратить внимание, что уменьшение времени, на которое обычные станции могут занимать канал, приводит к уменьшению доли пользовательских данных в одной передаче и снижению пропускной способности. Следовательно, величину TXOP Limit необходимо уменьшать не больше, чем до значения, которое обеспечивает требуемое ограничение на задержку.

4.2 Предварительный доступ к каналу (PCA)

Вторым методом является PCA, который заключается в предварительном доступе к каналу до появления кадра в очереди. Схема PCA изображена на рис. 1. Пусть RTA-станция в некотором интервале T_{exp} ожидает появления данных на передачу. Тогда за время T_{PCA} до начала этого интервала, RTA-станция начинает получать доступ к каналу для передачи RTS. В случае своевременной успешной передачи RTS точка доступа ответит CTS, и канал станет виртуально занят для всех других станций на время до окончания интервала T_{exp} . В итоге когда станция сгенерирует кадр с данными, он сразу будет передан. Длительность передачи RTA-кадра вместе с подтверждением обозначена T_s .

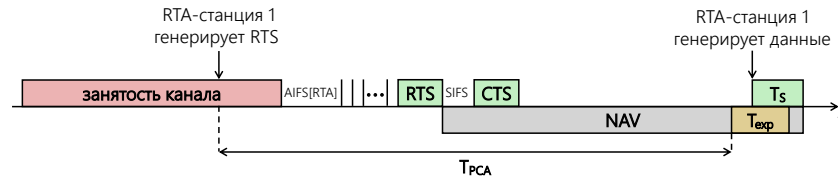


Рис. 1: Схема работы метода PCA.

Время T_{PCA} , за которое начинается предварительный доступ равно

$$T_{PCA} = TXOP\ Limit + AIFS[RTA] + W[RTA] \cdot T_e + T_{RTS} + SIFS + T_{CTS}.$$

Выбор такого значения T_{PCA} гарантирует успешное резервирование канала к моменту появления срочного кадра, если ровно одна RTA-станция начинает предварительный доступ (генерирует кадр RTS) во время занятости канала обычной станцией. Недостатком PCA является тот факт, что одна RTA-станция может на долгое время занять канал в то время, как у других RTA-станций могут быть кадры на передачу. В итоге могут стать значимы компоненты задержки, связанные с ожиданием окончания RTA-передач и конкуренцией с RTA-станциями.

4.3 Улучшенный предварительный доступ к каналу (Smart PCA)

В данной работе предлагается улучшенный метод предварительного доступа к каналу Smart PCA (англ.: Smart Preliminary Channel Access).

Если число M RTA-станций в сети не более одного или максимальное время резервирования канала меньше длительности одной RTA-передачи T_s :

$$\begin{cases} M = 1, \\ T_{PCA} - (T_{RTS} + SIFS + T_{CTS}) < T_s; \end{cases} \quad (1)$$

то процедура предварительного доступа в методе Smart PCA осуществляется так же, как в методе PCA. Иначе предварительный доступ модифицируется следующим образом.

RTA-станция начинает предварительный доступ, генерируя кадр RTS за время $T_{SmartPCA}$ до начала интервала T_{exp} . Через время SIFS после получения CTS от точки доступа RTA-станция передает специальный кадр SPCA. Он имеет такую же структуру, как кадр RTS, но имеет дополнительную информацию о времени начала и длительности интервала T_{exp} (рис. 2). После получения кадра SPCA другие RTA-станции, имеющие данные, могут получать доступ к каналу, если их передача закончится до начала T_{exp} . Если передача окажется неудачной, RTA-станции могут совершать повторные попытки, однако перед каждым доступом к каналу, они обязаны убедиться, что их передача закончится раньше интервала T_{exp} . По

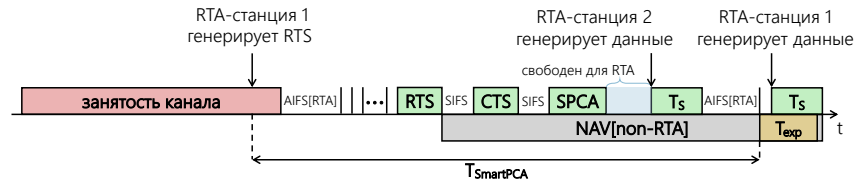


Рис. 2: Схема работы метода Smart PCA.

сравнению с методом PCA, в данном методе предварительный доступ необ-

ходимо начинать раньше из-за передачи дополнительного кадра SPCA:

$$T_{\text{SmartPCA}} = T_{\text{PCA}} + SIFS + T_{\text{SPCA}}.$$

Кадр SPCA вносит дополнительные расходы канальных ресурсов, и поэтому нет смысла его отправлять если выполняется условие (1), так как других RTA-станций либо нет, либо они не могут успеть передать во время резервирования. Таким образом, метод гарантирует, что при своевременной передаче RTS, RTA-станция, осуществляющая Smart PCA, сможет передать данные сразу, как только они появятся в интервале T_{exp} . Вместе с этим, при выполнении условия (1) улучшенный метод позволяет RTA-станциям сократить задержки, передавая данные в зарезервированном другой RTA-станцией канале.

Стоит отметить, что в методах PCA и Smart PCA передачи RTA-станций вместе с предварительным доступом отнимают больше канального времени у обычных станций, чем короткие RTA-передачи в методе Tuned EDCA.

5 Численные результаты

В работе рассматривается сеть Wi-Fi, состоящая из точки доступа, N обычных станций и M RTA-станций. Все станции идеально слышат передачи друг друга, то есть скрытые станции отсутствуют. Обычные станции работают в режиме насыщения и обслуживают трафик одной категории доступа с параметрами W_{min} , W_{max} , $AIFS_N$ и TXOP Limit. Обычные станции занимают канал на максимальное время TXOP Limit и используют механизм RTS/CTS для повышения пропускной способности.

RTA-станции генерируют квазипериодический трафик (рис.3): предполагаемое время появления кадра имеет период T_{period} , а реальное время распределено вокруг предполагаемого нормально со стандартным отклонением σ . Определим вокруг предполагаемого времени появления интервал, в котором RTA-станция ожидает данные как $T_{exp} = 10\sigma$, — это гарантирует, что с вероятностью более 0,99999 кадр с данными сгенерируется внутри T_{exp} . Все RTA-станции имеют одинаковые периоды T_{period} , но циклы раз-

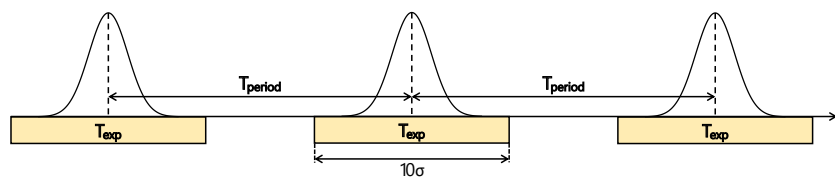


Рис. 3: Схема квазипериодического трафика RTA-станций.

ных RTA-станций сдвинуты друг относительно друга на случайную величину, равномерно распределенную на отрезке $[0, T_{period}]$. Категория доступа

для RTA-трафика имеет параметры $W_{min}[RTA] = W_{max}[RTA] \triangleq W[RTA]$ и $AIFS_N[RTA]$. Все RTA-станции используют одинаковую сигнально-кодую конструкцию, которая предполагается достаточно надежной, и кадры не теряются из-за случайного шума в канале. Размер RTA-кадров фиксирован и длительность их передачи с учетом подтверждения равна T_s . При этом рассматривается достаточно короткая длительность RTA-кадров, поэтому в методе Tuned EDCA механизм RTS/CTS не используется, чтобы не увеличивать задержку из-за передачи дополнительных кадров.

Численные параметры имитационного моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры моделирования.

T_e	$SIFS$	T_s	T_{RTS}	T_{CTS}	T_{SPCA}
9 мкс	16 мкс	504 мкс	53,6 мкс	24 мкс	53,6 мкс
$AIFS_N$	$AIFS_N[RTA]$	$W[RTA]$	W_{min}	W_{max}	N
10	2	8	16	1024	8

Для сравнения методов, описанных в разделе 4, рассматриваются следующие метрики качества обслуживания. Для RTA-трафика в качестве метрики используется *0,99999-квантиль* задержки, который показывает, какая задержка может быть гарантирована с вероятностью 0,99999. Метрикой качества обслуживания неприоритетного трафика является *эффективность* использования канала обычными станциями. Под эффективностью понимается доля времени, в течение которого успешно передаются пользовательские данные.

5.1 Влияние числа RTA-станций

Для начала рассмотрим зависимость введенных выше метрик от числа M RTA-станций. На рис. 4 представлены результаты имитационного моделирования трех методов обслуживания RTA-трафика для $T_{period} = 50$ мс, $\sigma = 10$ мкс и TXOP Limit = 2 мс. Для $M = 1$ квантиль задержки для PCA и Smart PCA совпадают, так как выполняется условие (1) и предварительный доступ в методах совпадает. При увеличении M PCA проигрывает не только методу Smart PCA, но и Tuned EDCA. Это объясняется тем, что в PCA общее время занятости канала одной RTA-станцией может достигать $T_{PCA} + T_s$, что вызывает большие задержки для другой RTA-станции, которая сгенерировала данные во время этого интервала занятости. Кроме того, до совершения успешной передачи, станция может проиграть конкуренцию нескольким другим RTA-станциям. При использовании Tuned EDCA основной вклад в задержку будет давать только время ожидания TXOP Limit

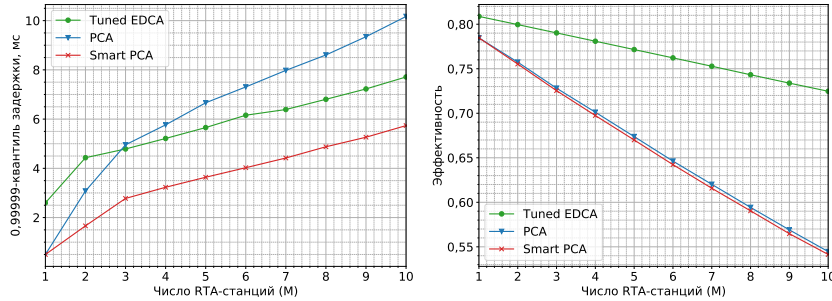


Рис. 4: Зависимость квантиля задержки и эффективности от числа RTA-станций M при $T_{period} = 50$ мс, $\sigma = 10$ мкс, TXOP Limit = 2 мс.

и нескольких коротких передач T_s в случае проигрыша нескольким RTA-станциям. Метод Smart PCA с ростом M сохраняет выигрыш в задержке у Tuned EDCA, однако проигрывает в эффективности.

5.2 Влияние величины TXOP Limit

Зафиксируем число RTA-станций $M = 5$, период RTA-графика $T_{period} = 20$ мс, величину $\sigma = 10$ мкс и рассмотрим зависимости квантиля задержки и эффективности от значения TXOP Limit. Рис. 5 показывает, что квантиль задержки в методах PCA и Tuned EDCA монотонно возрастает с увеличением TXOP Limit, а в методе Smart PCA с некоторой величины TXOP Limit квантиль выходит на постоянное значение. Это объясняется тем, что при низких значениях TXOP Limit выполняется условие (1), то есть RTA-станция не успевает передать в зарезервированном другой RTA-станцией канале, поэтому предварительный доступ осуществляется как в методе PCA. В этом случае с ростом TXOP Limit увеличивается время ожидания чужого резервирования. Но с некоторого значения TXOP Limit интервалы резервирования становятся достаточно большими, чтобы другие RTA-станции вместо ожидания передавали данные, сокращая задержки. В этом случае условие (1) не выполняется и в методе Smart PCA осуществляется улучшенный предварительный доступ, который обеспечивает постоянную задержку.

График эффективности для метода Tuned EDCA монотонно возрастает, потому что с увеличением TXOP Limit, растет как доля успешных передач, так и доля пользовательских данных внутри одной передачи. Эффективность в методах PCA и Smart PCA имеет максимум, так как кроме описанного выше эффекта, с ростом TXOP Limit увеличиваются значения T_{PCA} и $T_{SmartPCA}$, а значит и доля канального времени, которое у обычных станций отнимают RTA-передачи с учетом предварительного доступа. Небольшое отличие графиков эффективности в методах PCA и Smart PCA связано с отличием значений T_{PCA} и $T_{SmartPCA}$ из-за передачи дополнительного кадра SPCA.

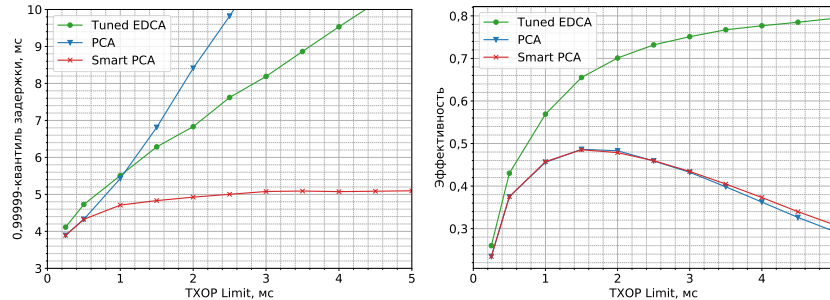


Рис. 5: Зависимость квантиля задержки и эффективности от TXOP Limit при $T_{period} = 20$ мс, $\sigma = 10$ мкс, $M = 5$.

5.3 Зависимости эффективности от квантиля задержки

Сравним методы в зависимости от требований на задержку. Для этого рассмотрим, как от квантиля задержки зависит эффективность исследуемых методов. На рис. 6 приведены результаты шести экспериментов при разных значениях числа RTA-станций, периода RTA-трафика и величины σ . Для выполнения требования на квантиль задержки (ось абсцисс) для каждого метода необходимо установить некоторое значение TXOP Limit, которое в свою очередь влияет на эффективность обычных станций (ось ординат). Таким образом, графики на рис. 6, включая горизонтальный участок, имеют смысл максимальной эффективности, которую обеспечивает метод при заданном ограничении на квантиль задержки.

Рассмотрим сначала строгие требования на задержку (3–5 мс). На рис. 6а представлены результаты для $T_{period} = 20$ мс и $\sigma = 10$ мкс и $M = 5$. Максимальная эффективность методов PCA и Smart PCA составляет 48%. При этом с такой же эффективностью Tuned EDCA может обеспечить задержку менее 5 мс. Таким образом, область, в которой при $T_{period} = 20$ мс метод Smart PCA дает выигрыш в эффективности, пренебрежимо мала.

Результаты для $T_{period} = 50$ мс при тех же значениях $\sigma = 10$ мкс и $M = 5$ представлены на рис. 6б. В этом случае становится значительной область, в которой Smart PCA обеспечивает заданный квантиль с наилучшей эффективностью. Так, если требование на задержку лежит в интервале от 3,2 мс до 4,6 мс, то выигрыш в эффективности достигает 100% по сравнению с методом Tuned EDCA и 30% по сравнению с PCA. При более строгих требованиях эффективности методов PCA и Smart PCA совпадают, так как устанавливается достаточно низкое значение TXOP Limit, из-за чего выполняется условие (1), поэтому процедура предварительного доступа в методах не отличается.

Увеличим период до $T_{period} = 100$ мс (рис. 6в). Область требований на задержку, при которых метод Smart PCA оказывается наиболее эффективным, становится шире. Выигрыш в эффективности по сравнению с Tuned

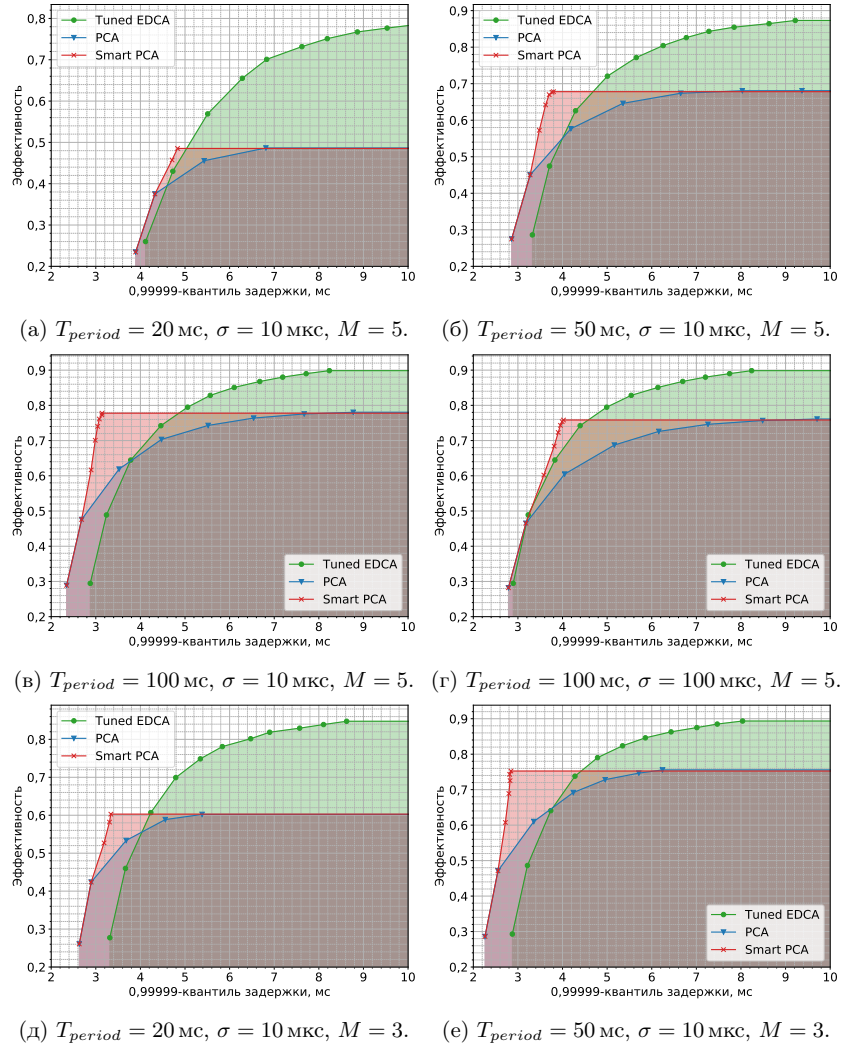


Рис. 6: Зависимости эффективности метода от обеспечиваемого им квантиля задержки.

EDCA достигает 100% ($\approx 70\%$ против $\approx 36\%$ при ограничении на задержку 3 мс) и 40% по сравнению с методом PCA ($\approx 78\%$ против $\approx 56\%$ при ограничении на задержку 3,2 мс). С ростом периода RTA-трафика увеличивается преимущество в эффективности метода Smart PCA, так как RTA-передачи

с предварительным доступом реже отнимают каналное время у обычных станций.

На рис. 6г приведены результаты при том же периоде $T_{period} = 100$ мс и числе RTA-станций $M = 5$ для увеличенного значения σ до 100 мкс. Метод Smart PCA гарантирует задержку 4 мс при максимальной эффективности 76%, в то время как метод Tuned EDCA обеспечивает такую же задержку при эффективности 68%. Таким образом, при большом значении σ выигрыш в эффективности метода Smart PCA падает примерно с 100% до 10%. Это объясняется тем, что увеличение σ увеличивает интервал T_{exp} , из-за чего предварительный доступ отнимает больше канального времени у обычных станций.

Уменьшим число RTA-станций до $M = 3$ при $T_{period} = 20$ мс и $\sigma = 10$ мкс (рис. 6д). В отличие от сценария с $M = 5$, в этом случае увеличивается область требований на задержку, при которых метод Smart PCA показывает наилучшую эффективность. При этом выигрыш в эффективности по сравнению с методом Tuned EDCA достигает значений более 100%, а по сравнению с PCA — более 30%. Таким образом, при небольшом числе RTA-станций разработанный метод оказывается самым эффективным при строгих требованиях на задержку даже при RTA-трафике с периодом $T_{period} = 20$ мс. Это объясняется тем, что при уменьшении числа RTA-станций снижается суммарное каналное время, отнимаемое у обычных станций, и задержка, связанная с конкуренцией между RTA-станциями.

Результаты для $T_{period} = 50$ мс при тех же значениях $\sigma = 10$ мкс и $M = 3$ представлены на рис. 6б. По сравнению со сценарием при $M = 5$ максимальный выигрыш в эффективности метода Smart PCA увеличивается до 150% в сопоставлении с Tuned EDCA и до 40% в сопоставлении с PCA. Результаты еще раз показывают, что при меньшем числе RTA-станций разработанный в данной работе метод может показывать более значительный выигрыш в эффективности.

Рассмотрим нестрогие требования на задержку (5–10 мс). Во всех приведенных сценариях метод Tuned EDCA наиболее эффективен в такой области требований на задержку. Например, Tuned EDCA может удовлетворять требование на задержку в 10 мс, сохраняя высокую эффективность (до 80%–90%). Таким образом, метод Smart PCA оказывается эффективнее метода Tuned EDCA только при строгих ограничениях на задержку передачи RTA-кадров.

6 Заключение

В данной работе предложен улучшенный метод предварительного доступа к каналу (Smart PCA) для обслуживания трафика реального времени в сетях Wi-Fi. Разработанный метод сравнивается с более простым, заключающимся в ограничении интервала времени, на который станции могут занимать канал для передачи несрочных данных, а так же с разработанным ранее методом предварительного доступа к каналу (PCA). В сравнении учитыва-

лось как качество обслуживания трафика приложений реального времени, так и эффективность использования канала станциями, обслуживающими трафик, не чувствительный к задержке.

С помощью имитационного моделирования было показано, что метод Smart PCA может обеспечить значительно более низкую задержку, чем метод PCA, если в сети присутствует несколько станций, обслуживающих трафик приложений реального времени. Предлагаемый в настоящей работе метод Smart PCA оказался наиболее эффективным в случае строгих ограничений на максимальную задержку (< 3 мс) и невысокой интенсивности срочных кадров. При этом увеличение отклонения времени прибытия данных уменьшает эффективность при использовании метода Smart PCA, то есть данный метод эффективен только в случае предсказуемого трафика.

Список литературы

1. IEEE 802.11 Real Time Applications TIG Report. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-2009-06-0rta-rta-report-draft.docx>.
2. Fast and accurate analytical tools to estimate network capacity for URLLC in 5G systems / Karamyshev Anton, Khorov E, Krasilov A, and Akyildiz Ian F // Computer Networks. — 2020. — Vol. 178. — P. 107331.
3. A framework to maximize the capacity of 5g systems for ultra-reliable low-latency communications / Khorov Evgeny, Krasilov Artem, Selnitskiy Ilya, and Akyildiz Ian F // IEEE Transactions on Mobile Computing. — 2020. — Vol. 20, no. 6. — P. 2111–2123.
4. IEEE P802.11beTM/D2.0 Draft Standard for Information Technology — Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements : 2022. — May.
5. Khorov Evgeny, Levitsky Ilya, Akyildiz Ian F. Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7 // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 88664–88688.
6. Bankov Dmitry, Chemrov Kirill, Khorov Evgeny. Tuning Channel Access to Enable Real-Time Applications in Wi-Fi 7 // 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) / IEEE. — 2020. — P. 20–25.
7. Resource Allocation Strategies for Real-Time Applications in Wi-Fi 7 / Avdotin Evgeny, Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, and Lyakhov Andrey // 2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) / IEEE. — 2020. — P. 1–6.
8. Modeling of Real-Time Multimedia Streaming in Wi-Fi Networks With Periodic Reservations / Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, Ivanov Alexander, and Akyildiz Ian F. // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 55633–55653.
9. Enabling real-time applications in Wi-Fi networks / Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, and Sandal Mark // International Journal of Distributed Sensor Networks. — 2019. — Vol. 15, no. 5.
10. Adame Toni, Carrascosa-Zamacois Marc, Bellalta Boris. Time-Sensitive Networking in IEEE 802.11be: On the Way to Low-Latency WiFi 7 // Sensors. — 2021. — Vol. 21, no. 15. — Access mode: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/15/4954>.

11. Multi-Link for Low Latency. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/20/11-20-0093-02-00be-multi-link-for-low-latency.pptx>.
12. Naik Gaurang, Ogbe Dennis, Park Jung-Min Jerry. Can Wi-Fi 7 Support Real-Time Applications? On the Impact of Multi Link Aggregation on Latency // Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Xiamen, China. — 2021. — P. 28–30.
13. An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11be Multi-link Operation / Carrascosa Marc, Geraci Giovanni, Knightly Edward, and Bellalta Boris // arXiv preprint arXiv:2111.09281. — 2021.
14. Park Hyunhee, You Cheolwoo. Latency Impact for Massive Real-Time Applications on Multi Link Operation // 2021 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP). — 2021. — P. 1–5.
15. Genc Eda, Del Carpio Luis Felipe. Wi-Fi QoS Enhancements for Downlink Operations in Industrial Automation Using TSN // 2019 15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS) / IEEE. — 2019. — P. 1–6.
16. Reducing Channel Access Delay for RTA Traffic. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/19/11-19-1960-01-00be-reducing-channel-access-delay-for-rta-traffic.pptx>.

Исследование планировщиков MU-MIMO для веб- и видеотрафика в сетях Wi-Fi *

В.А. Логинов, И.А. Старцев, С.А. Тутельян, Е.М. Хоров

{loginov, startsev, tutelian, khorov}@wireless.iitp.ru

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

Аннотация Использование многопользовательских многоантенных передач MU-MIMO в сетях Wi-Fi призвано увеличить номинальные скорости доставки данных. Однако возможность обеспечить выполнение требований к качеству обслуживания для разнообразных приложений существенно зависит от используемого алгоритма планирования радиоресурсов для передач MU-MIMO. В работе предлагается обобщенный алгоритм планирования передач MU-MIMO, который жадным образом максимизирует заданную функцию полезности. В работе также рассматриваются две функции полезности, которые целесообразно использовать для обслуживания веб- и видеотрафика.

Ключевые слова: MU-MIMO, Wi-Fi, веб-трафик, видеотрафик, качество обслуживания.

1 Введение

Рост объемов данных, передаваемых по беспроводным локальным сетям, требует постоянного повышения их пропускных способностей. Одним из наиболее перспективных методов повышения пропускной способности является использование технологии многоантенных (Multiple Input Multiple Output, MIMO) и многопользовательских многоантенных (Multi-User MIMO, MU-MIMO) передач. С помощью MIMO можно передать несколько пространственных потоков данных между парой устройств, что в теории должно кратно увеличить пропускную способность канала между ними. С помощью MU-MIMO указанные потоки могут быть направлены разным пользователям.

Однако пространственные потоки не являются строго ортогональными, и при передаче нескольких потоков возникает межпоточковая интерференция, из-за которой часто бывает невозможно использовать высокоскоростные сигнально-кодированные конструкции (СКК). Поэтому, при использовании

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект №20-19-00788).

MU-MIMO особо остро стоит задача планирования MU-MIMO передач таким образом, чтобы при выбранном множестве пользователей, назначенном числе потоков каждому пользователю и распределенной мощности между потоками передать наибольший объем данных. Стоит отметить, что решение такой задачи хотя и обеспечивает максимальную спектральную эффективность, но не приводит к наилучшему качеству обслуживания пользовательского трафика. Например, для веб-трафика нужно быстро загружать веб-страницы. Это значит, что нужно выделить конкретному пользователю за короткое время большое количество ресурсов, что необязательно оптимально с точки зрения спектральной эффективности. Для видеотрафика, например, генерируемого приложением Youtube, важно обеспечить стабильно высокую скорость передачи данных. В противном случае приложение снизит битрейт для предотвращения прерываний воспроизведения видеопотока.

Разработка алгоритмов планирования передач MU-MIMO с учетом выполнения требований к качеству обслуживания особенно остро стоит для сетей Wi-Fi, где важно обеспечить не только высокую скорость передачи данных, но и низкую вычислительную сложность, поскольку решение должно быть принято за микросекунды в отличие от сотовых сетей, где на него отводится 0,5 – 1 мс.

Использованию MIMO в сетях Wi-Fi посвящено большое число работ. Авторы [1] исследовали использование MIMO в сетях Wi-Fi IEEE 802.11ac. Предложены изменения к стандарту, направленные на повышение пропускной способности при использовании MU-MIMO. В работе также рассматривается выбор пользователей на передачу по двум стратегиям: циклически (Round Robin, RR) или согласно пропорционально честной метрике (Proportional Fair, PF). Показано, что данные стратегии обеспечивают близкую к идеальной честность для пользователей, даже когда пользователи испытывают разное затухание в канале.

В данной работе предлагается обобщенный алгоритм планирования передач MU-MIMO в сетях Wi-Fi, который жадным образом максимизирует заданную функцию полезности, а затем рассматриваются функции полезности для веб- и видеотрафика.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 описывается используемая модель сети Wi-Fi и MIMO передач. В разделе 3 описана постановка задачи планирования радиоресурсов, рассмотрены две функции полезности и описан предложенный алгоритм. В разделе 4 приводятся численные результаты. Раздел 5 завершает работу.

2 Модель системы

2.1 Передачи с помощью MU-MIMO

Рассмотрим сеть Wi-Fi, в которой выполняется передача от точки доступа к станциям с помощью MU-MIMO. Пусть отправитель (т.е. точка доступа)

имеет N_{TX} антенн, а каждый получатель — N_{RX} антенн. Следовательно, общее количество N_{sig} пространственных потоков, которые могут быть переданы, не превышает N_{TX} , а число пространственных потоков, которые может принимать каждый получатель, не превышает N_{RX} .

Пусть станция s должна принять $N_s \leq N_{RX}$ пространственных потоков. Получаемый станцией сигнал y_s может быть выражен следующим образом:

$$y_s = W_s H_s V x + W_s \eta,$$

где $x \in \mathbb{C}^{N_{sig} \times 1}$, $\|x\| = 1$ — нормализованный вектор передаваемых символов; $V \in \mathbb{C}^{N_{TX} \times N_{sig}}$, $\|V\|^2 \leq p$ — прекодер, норма которого ограничена доступной мощностью p на передачу; $H_s \in \mathbb{C}^{N_{RX} \times N_{TX}}$ — канальная матрица между передатчиком и станцией s ; $W_s \in \mathbb{C}^{N_s \times N_{RX}}$ — матрица детектора станции s ; $\eta \in \mathbb{C}^{N_{RX} \times 1}$ — аддитивный белый гауссовский шум.

Прекодер и матрицы детекторов могут строиться разными способами. В данной работе в качестве метода построения прекодера выбран используемый во многих системах Zero-Forcing (ZF):

$$V_{ZF} = H^*(H H^*)^{-1},$$

где H — канальная матрица. В качестве метода построения детектора выбран метод Linear Minimum Mean Square Error (L-MMSE):

$$W_{L-MMSE} = (H_{eff}^* H_{eff} + \sigma^2 \mathbb{I})^{-1} H_{eff}^*,$$

где матрица H_{eff} определяет эффективную канальную матрицу: $H_{eff} = H_s V$; \mathbb{I} — единичная матрица, σ^2 — средняя мощность шума.

2.2 Сценарий

В работе рассматривается модель сети Wi-Fi стандарта 802.11ax с одной точкой доступа. Вокруг точки доступа равномерно распределены станции на диске с внутренним радиусом r и внешним радиусом R . Точка доступа может передавать либо трафик приложения Youtube, либо веб-трафик. Веб-трафик представляет собой загрузку отдельных веб-страниц, которые представляются потоками конечной длины (~ 1 –10 МБ). Трафик приложения Youtube является набором видеоклипов, состоящих из отдельных видеосегментов. Каждой из станций предназначается либо веб-трафик, либо видеотрафик. Начала передачи потоков берутся из экспоненциального распределения; если точка доступа завершила передачу веб-страницы или видеоклипа на станцию, то через случайный промежуток времени, взятый из экспоненциального распределения, на точку доступа приходит новый поток для этой станции.

Точка доступа может использовать MIMO при выполнении передач. В данной работе будут рассмотрены случаи как использования только однопользовательских передач (Single-User MIMO, SU-MIMO), так и применение MU-MIMO. В случае использования SU-MIMO возможно передать большие

объемы информации для одного пользователю, в то время как передачи MU-MIMO дают возможность передавать данные двум и более пользователям одновременно на больших скоростях в случае, если соответствующие каналы слабо скоррелированы.

3 Планирование радиоресурсов

3.1 Постановка задачи

При передаче с помощью MIMO точка доступа должна определить набор станций на передачу, построить прекодер и назначить им СКК. Данная задача распределения ресурсов решается с помощью оптимизации некоторой функции полезности. Пусть S — множество станций, для которых есть данные, L — множество доступных СКК. Пусть также задана функция $\lambda(s, l, k, Y_{al})$, которая характеризует качество решения при назначении станции s количества потоков k и СКК l . Последним параметром Y_{al} является набор пар станция/количество пространственных потоков, выбранных для передачи, который включает и пару (s, k) . Данный параметр нужен, так как при использовании MU-MIMO получаемые значения SNR и, как следствие, возможные скорости передачи зависят от выбранной группы пользователей и количества назначенных им пространственных потоков. При этом при использовании SU-MIMO Y_{al} состоит только из одной пары (s, k) , в связи с чем в случае использования однопользовательских передач данный параметр можно опустить.

Если станция не может принять кадр, то $\lambda(s, l, k, Y_{al}) = 0$. Точка доступа может определить это следующим образом. В работе считается, что состояние канала каждой станции известно точке доступа. В этом случае точка доступа строит прекодер и матрицы детекторов станций из Y_{al} , используя точную матрицу канала. По этим данным можно определить вероятность ошибки при приеме кадров при заданных СКК и количестве пространственных потоков. Если эта вероятность меньше некоторого порога, то $\lambda(s, l, k, Y_{al}) = 0$.

Стоит отметить, что при фиксировании определенного множества Y_{al} можно вычислить получаемые значения SNR на каждой станции, участвующей в передаче. Зная эти значения, можно выбрать лучшую СКК для каждой станции, которые можно использовать при полученном отношении сигнал/шум. Обозначим такую процедуру выбора СКК так: $L_{best}(s, Y_{al})$. Тогда можно определить следующую функцию, характеризующую качество распределения ресурсов:

$$F(Y_{al}) = \sum_{(s,k) \in Y_{al}} \lambda(s, L_{best}(s, Y_{al}), k, Y_{al}). \quad (1)$$

Задачу выбора лучшего распределения радиоресурсов можно записать в следующем виде:

$$\max_{Y_{al}} F(Y_{al}) = \max_{Y_{al}} \left(\sum_{(s,k) \in Y_{al}} \lambda(s, L_{best}(s, Y_{al}), k, Y_{al}) \right), \quad (2)$$

где $\max_{Y_{al}}$ означает выбор максимума функции по всем возможным наборам пользовательских станций и назначенным пространственным потокам.

3.2 Функции полезности

Обозначим функцию $\lambda(s, L_{best}(s, Y_{al}), k, Y_{al})$, показывающую качество решения, более кратким образом как $\lambda(s)$. Данную функцию можно задавать разными способами. В работе рассматривается два подхода: Proportional Fair (PF), обеспечивающий как высокую спектральную эффективность, так и справедливое распределение радиоресурсов в смысле объема частотно-временных ресурсов, а также Least Attained Service (LAS), который нацелен на максимизацию среднегеометрической скорости загрузки веб-страниц. Далее рассмотрим эти подходы более подробно.

В подходе PF [2] используется следующая функция полезности:

$$\lambda(s) = \frac{C(s)}{A_t(s)},$$

где $C(s) = (s, L_{best}(s, Y_{al}), k, Y_{al})$ — скорость передачи данных станции s на СКК l , используя k пространственных потоков, $A_t(s)$ — средняя скорость передачи на станцию s , соответствующая текущему моменту распределения ресурсов, то есть временному слоту текущей передачи t . Метод PF нацелен на обеспечение высокой пропускной способности при обслуживании всех пользователей.

Функция $A_t(s)$ обновляется следующим образом [3, 4]:

$$A_{t+1}(s) = (1 - \alpha)A_t(s) + \alpha C_t(s),$$

где t и $t+1$ — текущий и следующий слоты передачи соответственно, $C_t(s)$ — выбранная скорость передачи данных (то есть с учетом СКК и количества пространственных потоков) на станцию s в слоте t , $\alpha \in [0, 1]$ — коэффициент сглаживания. Если станция s не обслуживалась в данном временном слоте, то $C_t(s) = 0$.

Рассмотрим возможные значения коэффициента α : если α близко к единице, то $A(s)$ может быстро меняться и влияние истории минимально, в то время как, если α близко к нулю, то средняя скорость меняется медленно, и отдельные выбросы $C(s)$ почти не влияют на данную оценку. Как было отмечено ранее, в случайные моменты на точку доступа приходят потоки данных, которые имеют конечную длину. В связи с этим могут возникать периоды простоя, когда нет потоков на передачу, и, следовательно, время

между слотами передачи является переменным. Поэтому в качестве параметра α было выбрано следующее выражение [4]:

$$\alpha = 1 - e^{-\omega \cdot \Delta t}, \quad (3)$$

где Δt — время между соседними передачами, ω — задаваемый параметр окна. В этом случае, если передач давно не было, параметр α приближается к единице, что означает, что средняя скорость будет определяться в основном новыми значениями скоростей передачи.

Другим рассмотренным методом является подход LAS [5]:

$$\lambda(s) = \frac{C(s)}{Q(s)},$$

где $Q(s)$ — количество уже переданных данных на станцию s . Чем меньше данных было передано на станцию s , тем выше значение функции λ и, следовательно, тем выше ее приоритет. Данный метод хорошо подходит для быстрого обслуживания передачи небольших потоков данных, то есть, например, для передачи веб-трафика.

3.3 Алгоритм планирования

Отношения сигнал/шум, получаемые на станциях при передаче ММО, существенным образом зависят от набора станций, участвующих в этой передаче. Поэтому точное решение задачи (2) требует перебора по всем возможным наборам станций и пространственных потоков, что имеет экспоненциальную сложность по числу пользователей. Поэтому для решения этой задачи в данной работе предлагается использовать жадный алгоритм, который описывается далее.

Пусть уже задано некоторое распределение ресурсов, то есть задано множество Y_{al} . В этом случае все станции можно разделить на три множества:

- S^{free} — станции, которым не были выделены ресурсы: $s \in S^{free} \implies (s, k) \notin Y_{al} \forall k$.
- S^{part} — выбранные для передачи станции с назначенным числом пространственных потоков меньше максимального: $s \in S^{part} \implies \exists (s, k) \in Y_{al}, k < N_{RX}$.
- S^{full} — выбранные для передачи станции с назначенным числом пространственных потоков равным максимальному: $s \in S^{full} \implies \exists (s, k) \in Y_{al}, k = N_{RX}$.

Алгоритм выполняется пошагово.

На первом шаге $Y_{al} = \emptyset$.

На каждом шаге Y_{al} изменяется следующим образом: либо добавляется один пространственный поток к какой-нибудь станции из S^{part} , либо к Y_{al} добавляется новая станция из S^{free} с числом пространственных потоков

равным одному. Выбор происходит с помощью суммарной функции полезности (1): выбирается такой вариант, при котором данная функция получает наибольший прирост, то есть

$$\max \left\{ \begin{aligned} & \max_{s_{new} \in S^{free}} \sum_{(s,k) \in Y'_{al}} \lambda(s, L_{best}(s, Y'_{al}), k, Y'_{al}), \\ & \max_{s_{old} \in S^{part}} \sum_{(s,k) \in Y''_{al}} \lambda(s, L_{best}(s, Y''_{al}), k, Y''_{al}) \end{aligned} \right\},$$

$$Y'_{al} = \{(s_{new}, 1) \cup Y_{al}\},$$

$$Y''_{al} = \{(s_{old}, k + 1) \cup \{Y_{al} \setminus (s_{old}, k)\}\}.$$

Алгоритм продолжает свою работу пока суммарная функция полезности повышается, или пока общее число пространственных потоков меньше N_{TX} , или существуют станции из $\{S^{free} \cup S^{part}\}$. Если одно из данных условий перестает быть верным, то алгоритм завершается, и точка доступа передает, используя полученные назначения Y_{al} .

4 Численные результаты

Для оценки эффективности предложенного алгоритма построена имитационная модель сети 802.11ax на базе платформы имитационного моделирования ns-3 [6] с возможностями использования SU/MU-MIMO. В качестве модели канала используется Model-D NLOS [7]. Точка доступа работает в канале 40 МГц в диапазоне 5 ГГц. Максимальная мощность передачи $p = 20$ дБм. Мощность теплового шума в 20 МГц составляет -94 дБм. Значения радиусов круга r и R , в котором равномерно распределено 20 пользователей, равны 5 и 20 метров соответственно. Количество антенн на точке доступа $N_{TX} = 4$, количество антенн на пользовательских станциях $N_{RX} = 2$.

Размеры веб-страниц задаются усеченным логнормальным распределением с минимальным, средним и максимальным значениями 1 КБ, 2 МБ и 50 МБ соответственно. Время прихода новой веб-страницы распределено экспоненциально с минимальным, средним и максимальным значениями 1 с, 3 с и 6 с соответственно. Трафик приложения Youtube представлен видеоклипами, закодированными в разных разрешениях (144p, ..., 2160p), длительность которых лежит в интервале от 90 с до 110 с. Видеоклипы содержатся в базе данных, и из нее случайным образом выбираются для передачи. Время прихода нового видеоклипа распределено экспоненциально с минимальным, средним и максимальным значениями 10 с, 30 с и 60 с соответственно.

Для анализа эффективности обслуживания веб-трафика рассматриваются пропускная способность и среднее геометрическое скорости загрузки, для трафика видеоприложения — средняя длительность пауз воспроизведения и средний битрейт видеопотока.

На рис. 1 и 2 представлены графики зависимости пропускной способности и средней геометрической скорости загрузки веб-страниц в зависи-

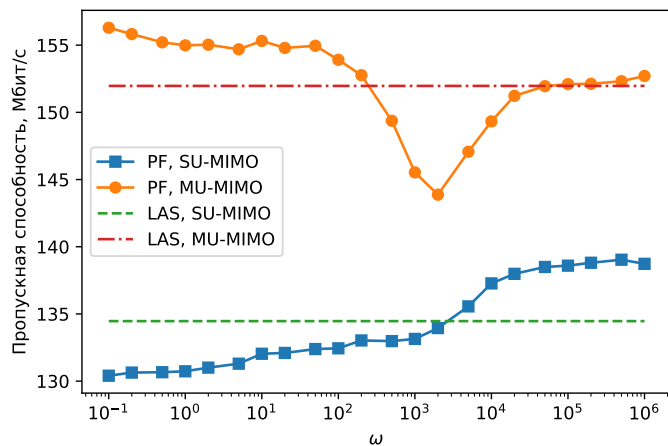


Рис. 1: Пропускная способность веб-трафика

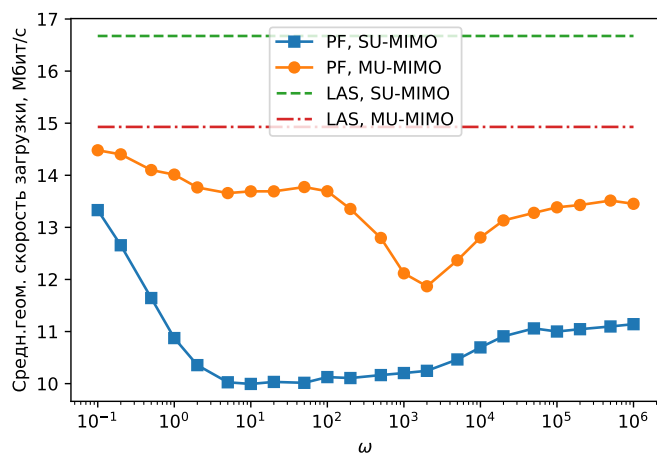


Рис. 2: Среднее геометрическое скорости загрузки веб-трафика

ности от окна ω , которое определяет степень изменения средней скорости (3). Можно сделать однозначный вывод о том, что при использовании MU-MIMO вместе с PF значение окна не должно превышать 10^2 . Таким образом проигрыш в средней геометрической скорости загрузки будет состав-

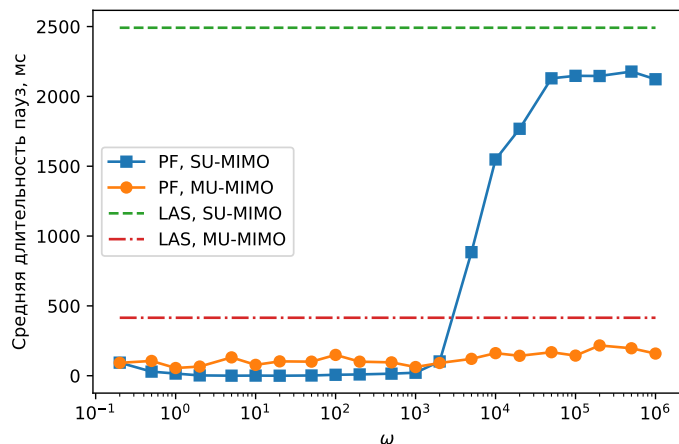


Рис. 3: Средняя длительность пауз воспроизведения видеопотоков Youtube

лать менее 10%, однако останется честное распределение радиоресурсов, высокая спектральная эффективность и, кроме того, получится большая пропускная способность относительно LAS. При использовании SU-MIMO пропускная способность PF будет выше LAS метода только при значении окна выше 10^3 , в то время как среднее геометрическое скорости загрузки у PF всегда меньше LAS во всем рассматриваемом диапазоне значений ω .

Для трафика Youtube на рис. 3 и 4 приведены графики средней длительности пауз воспроизведения и среднего битрейта от ω . Характер поведения среднего битрейта аналогичен характеру поведения пропускной способности для веб-трафика. Стоит также отметить, что PF дает практически нулевую задержку при работе использования MU-MIMO при любых значениях окна и даже меньшую задержку по сравнению с LAS при использовании SU-MIMO и значениях окна меньших 10^3 . Так же можно заметить, что использование LAS приводит к заметным паузам воспроизведения видеопотоков Youtube. Тем не менее, средний битрейт ведет себя аналогично пропускной способности веб-трафика и не отстает от PF метода.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Многопользовательский планировщик LAS действительно обслуживает более одного пользователя параллельно, за счет чего скорость доставки веб-страниц повышается на 20%. Использование планировщика PF позволяет повысить спектральную эффективность, однако его эффективность существенно зависит от окна сглаживания и среднее геометрическое скорости загрузки страниц оказывается существенно меньше, чем для LAS.

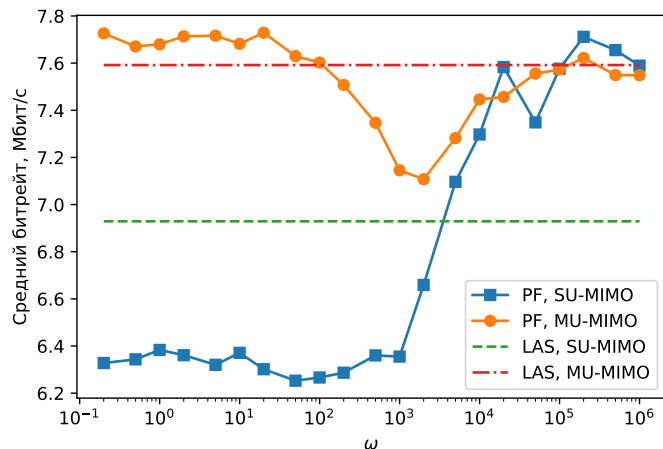


Рис. 4: Средний битрейт видеопотоков Youtube

Для видео-трафика целесообразно использовать планировщик PF. При этом, чтобы избежать пауз в воспроизведении необходимо использовать малое окно сглаживания и запрещать многопользовательские передачи, хотя это и приведет к снижению битрейта.

5 Заключение

В работе исследовано использование многопользовательских многоантенных передач MU-MIMO в сетях Wi-Fi. Разработан обобщенный алгоритм планирования передач MU-MIMO, который жадным образом максимизирует заданную функцию полезности. Рассмотрены два типа трафика: веб-трафик и видеотрафик. Исходя из их требований к качеству обслуживания подобраны соответствующие функции полезности. Установлено, что стратегии планирования радиоресурсов для веб-трафика и видеотрафика должны существенно отличаться. Разработка общего алгоритма планирования является целью дальнейших исследований.

Список литературы

1. K.-h. Lee and C.-k. Kim, "User scheduling for mu-mimo transmission with active csi feedback," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2015, no. 1, pp. 1–12, 2015.
2. H. Kim and Y. Han, "A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems," *IEEE Communications letters*, vol. 9, no. 3, pp. 210–212, 2005.

3. T. B. L. E. L. R. Ramjee, T. Bu, and L. Li, "Generalized proportional fair scheduling in third generation wireless data networks," in *IEEE INFOCOM*, 2006, pp. 1–12.
4. A. Eckner, "Algorithms for unevenly spaced time series: Moving averages and other rolling operators."
5. I. F. Akyildiz, E. Khorov, A. Kiryanov, D. Kovkov, A. Krasilov, M. Liubogoshchev, D. Shmelkin, and S. Tang, "xstream: A new platform enabling communication between applications and the 5g network," in *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2018, pp. 1–6.
6. "Network Simulator 3 (NS-3)." [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>
7. "TGac channel model addendum," 2009. [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/09/11-09-0308-03-00ac-tgac-channel-model-addendum-document.doc>