

Левицкий Илья Александрович

**Методы повышения производительности  
многоканальных устройств в сетях Wi-Fi 7**

Специальность: 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа прошла апробацию на кафедре «Проблем передачи информации и анализа данных» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** кандидат технических наук,  
**Хоров Евгений Михайлович**

**Ведущая организация:** TBD

Защита состоится **XX.XX.2025** года в **XX:00** на заседании диссертационного совета **TBD** по адресу **TBD**

С диссертацией можно ознакомиться в **TBD**

Ученый секретарь, **TBD** **TBD**

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы.

По мере развития инфокоммуникационных технологий появляются и все более широко используются приложения, требующие высокую скорость и низкую задержку при доставке данных. Примерами таких приложений являются приложения виртуальной реальности (англ.: Virtual Reality, VR), дополненной реальности (англ.: Augmented Reality, AR) и потокового вещания с высоким разрешением. Для удовлетворения их требований к скорости и задержке в 2024 г. опубликовано дополнение к стандарту технологии Wi-Fi — IEEE 802.11be — также известное как Wi-Fi 7. Одним из главных нововведений IEEE 802.11be является технология многоканальных передач (МКП). Она позволяет многоканальным устройствам (МКУ) (англ.: Multi-Link Device, MLD) использовать одновременно несколько частотных каналов для передачи данных. В отличие от предыдущих технологий, ранее описанных в стандарте IEEE 802.11, таких как объединение каналов (англ.: channel bonding), технология многоканальных передач более гибкая и позволяет эффективнее использовать частотные ресурсы. Это обеспечивается за счет независимого доступа к среде в каждом канале, возможности использования каналов разной ширины и независимого управления параметрами передачи в каждом из них.

На практике МКУ не всегда могут получать доступ к среде в разных каналах независимо из-за межканальной интерференции (англ.: inter-channel interference). Она возникает из-за неидеальности фильтров, когда передаваемый сигнал создает наводки на принимающем тракте в другом частотном канале. Этот эффект значительно ухудшает качество приема сигнала и не позволяет МКУ прослушивать один канал, когда оно передает в другом. Поэтому в дополнении IEEE 802.11be в зависимости от взаимного влияния передач в паре каналов могут использоваться два режима работы: одновременные прием и передача (ОПП) (англ.: Simultaneous Transmission and Reception, STR), если нет взаимной межканальной интерференции, и неодновременные прием и передача (НОПП) (англ.: Non-Simultaneous Transmission and Reception, NSTR), если интерференция есть. Возможность «ОПП» является атрибутом конкретной пары каналов, а не всего МКУ. Однако в работе для простоты рассматриваются МКУ, работающие в двух каналах. Для краткости, будем называть МКУ с двумя каналами с поддержкой ОПП — ОПП МКУ, а без нее — НОПП МКУ.

Для достижения наилучшей производительности в реальных сценариях требуются алгоритмы, управляющие действиями как НОПП МКУ, так и ОПП МКУ. Первым требуется контролировать доступ к среде в разных каналах с учетом ограничения НОПП, что делает управление многоканальной передачей сложной задачей. Несмотря на то, что в дополнении IEEE 802.11be описаны методы доступа к каналу для МКУ, оно не специфицирует, какие именно следует применять методы и какие параметры передач использовать для достижения высокой скорости передачи.

Для эффективного использования канальных ресурсов устройства Wi-Fi

передают длинные кадры, агрегирующие несколько пакетов данных. Часть пакетов может быть доставлена неуспешно, и для отслеживания передаваемых пакетов и повторной отправки недоставленных используется специальный буфер ограниченного объема. Это ограничение может приводить к нехватке пакетов, готовых к передаче, и уменьшению пропускной способности, что следует учитывать на МКУ для повышения эффективности передач.

Диссертация посвящена разработке и исследованию методов повышения пропускной способности многоканальных устройств Wi-Fi 7 с поддержкой и без поддержки режима ОПП с учетом реальных сценариев практического использования.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Исследования множественного доступа в беспроводных сетях, в том числе и для МКУ, и связанных с ним задач проводились во множестве работ. Среди них следует отметить работы российских и зарубежных ученых, так как В.М. Вишневецкий, Ю.В. Гайдамака, А.В. Дворкович, А.Н. Красилов, Е.А. Крук, Н.А. Кузнецов, А.А. Куреев, Е.А. Кучерявый, В.А. Логинов, А.И. Ляхов, А.А. Мальцев, К.Е. Самуйлов, С.Н. Степанов, А.М. Тюрликов, Е.М. Хоров, Б.С. Цыбаков, В. Bellalta, G. Bianchi, W.B. Lee, A. Zubow, и др. Работы, посвященные МКП, можно разделить на три ключевых направления: (i) архитектура МКУ и межканальная интерференция, (ii) методы доступа, предотвращающие интерференцию при приеме, и (iii) правила распределения пакетов по каналам. Существует малое число исследований в первом направлении, которые посвящены межканальной интерференции и возможности использования режима ОПП в МКУ. Однако и эти исследования потеряли актуальность из-за прогресса в технологии IEEE 802.11 и улучшения качества оборудования. Больше число работ посвящено второму направлению, т. е. разработке и исследованию методов доступа НОПП МКУ. Однако эти работы не учитывают реальных характеристик внешнего трафика, что искажает оценку эффективности этих методов, или вовсе не решают задачу поиска лучшего метода доступа для увеличения пропускной способности. Более того, хотя метод доступа для НОПП МКУ уже стандартизирован в IEEE 802.11be, остается нерешенным вопрос о его оптимальном управлении. Исследования из третьего направления посвящены алгоритмам распределения пакетов и их агрегации в кадры для ОПП МКУ с целью уменьшения задержек. Однако влияние общей очереди и потери пакетов на пропускную способность в этих работах не изучено. В частности из-за этого являются неэффективными рассматриваемые в литературе алгоритмы, где все доступные пакеты передаются в первом освободившемся канале или где в канале передается одинаковая доля пакетов. Наконец, в подавляющем большинстве работ рассматриваются лишь однородные каналные условия, т. е. равные емкости (максимальные пропускные способности канала с учетом накладных расходов) и загрузки каналов.

**Объектом исследования** являются беспроводные локальные сети Wi-Fi, а **предметом исследования** — методы множественного доступа многоканальных

устройств Wi-Fi.

**Целью диссертации** является разработка алгоритмов и методов управления передачей данных для повышения производительности многоканальных устройств в сетях Wi-Fi 7. Для достижения поставленной цели в работе ставятся и решаются следующие задачи:

1. Экспериментальное определение области применимости режима ОПП и разработка метода, расширяющего эту область.
2. Разработка и исследование алгоритма управления агрегацией кадров в ОПП МКУ для повышения их пропускной способности при ограниченном размере буфера пакетов.
3. Разработка и исследование алгоритма управления доступом к среде для НОПП МКУ для повышения их пропускной способности при наличии одноканальных устройств.

**Методы исследования.** В диссертации используются методы математической статистики, теории оптимизации, теории вероятностей, теории случайных процессов, а также имитационного моделирования. Также в практической части работы используются методы планирования эксперимента, измерения, сравнения и анализа результатов.

**Научная новизна.** В диссертации работе получены следующие новые результаты:

1. Предложен метод условной поддержки режима ОПП, позволяющий МКУ сократить минимальное спектральное расстояние, при котором возможно использовать режим ОПП.
2. Разработан и исследован алгоритм управления агрегацией кадров в ОПП МКУ, учитывающий ограниченность общего для всех каналов буфера пакетов, а также число отправленных, но еще не подтвержденных пакетов.
3. Разработан и исследован алгоритм управления механизмом доступа к среде для НОПП МКУ в Wi-Fi 7, адаптивный к изменению загрузки каналов.

#### **Практическая значимость работы.**

Практическая значимость диссертации заключается в определении условий, при которых в мобильных многоканальных устройствах возможно использование режима ОПП, а также в расширении области применимости этого режима. Кроме того, предложенные в данной работе алгоритмы позволяют увеличить пропускную способность многоканальных устройств Wi-Fi. Результаты работы внедрены и используются на практике, а также в учебном процессе на кафедре проблем передачи информации и анализа данных МФТИ в ИППИ РАН, что подтверждено соответствующими актами. В частности, разработанные алгоритмы использованы в НИР, выполняемых ИППИ РАН по проектам: РНФ «Моделирование, исследование и разработка алгоритмов управления для сверхвысокоскоростных беспроводных локальных сетей передачи данных» (No 20-19-00788), Государственное задание ИППИ РАН «Разработка и анализ методов повышения производительности беспроводных сетей нового поколения» (No FFNU-2022-0036), Государственное задание ИППИ РАН «Методы обеспечения

сверхнадежной связи с малой задержкой для высокоавтоматизированных транспортных средств и беспилотных летательных аппаратов» (No FFNU-2025-0030). Разработанный метод условной поддержки режима ОПП представлен на собрании рабочей группы по стандартизации IEEE 802.11be.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный метод условной поддержки режима ОПП позволяет в смартфоне снизить требуемое спектральное расстояние для одновременного приема и передачи с 250 МГц до 100 МГц.
2. Сформулирована и доказана теорема об оптимальности разработанного алгоритма управления агрегацией в сценариях с каналами без потерь и с постоянными накладными расходами.
3. Для каналов с потерями разработанный алгоритм управления агрегацией повышает пропускную способность до 50% по сравнению с алгоритмами из литературы.
4. Разработанный алгоритм управления механизмом доступа для НОПП МКУ адаптивно выбирает наилучший режим работы в широком диапазоне сценариев.

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на ведущих международных и российских конференциях: 23rd International Symposium on Theory, Algorithmic Foundations, and Protocol Design for Mobile Networks and Mobile Computing (г. Сеул, Южная Корея, 2022 г.), International Conference Engineering and Telecommunication (En&T), «Информационные технологии и системы» (Россия, 2020, 2021, 2023 гг.), «64-я Всероссийская научная конференция МФТИ» (г. Долгопрудный, Россия, 2021 г.), а также на Московском телекоммуникационном семинаре и семинарах ИППИ РАН.

**Публикации.** По теме диссертации было опубликовано 13 работ: Работы [1–8] опубликованы в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, в том числе [1–5] — в изданиях, включенных в «Белый список» (категория K1). Работы [9–12] опубликованы в сборниках трудов иных конференций. Предложение [13] опубликовано на портале mentor.ieee.org рабочей группы IEEE 802.11 и представлено на заседании комитета по стандартам локальных и городских сетей.

Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Во всех приведенных работах вклад соавторов заключался в постановке задач, частичном анализе литературы, частичном анализе численных результатов. Анализ технологии МКП в IEEE 802.11be [1–4], разработанные экспериментальные стенды и полученные с их помощью результаты [7–11, 13], а также являющиеся основными результатами диссертации метод условной поддержки режима ОПП [13], алгоритм управления агрегацией кадров и теорема о его оптимальности при нулевых потерях [5] и алгоритм управления доступом к среде многоканальных устройств [6, 12] сделаны диссертантом лично.

**Структура и объем работы.** Данная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объем работы 124 страницы, включая 28 рисунков и 4 таблицы. Библиография включает 98 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** приведен обзор методов множественного доступа в сетях Wi-Fi разных поколений, дано описание технологии многоканальных передач, приводится обзор работ, посвященных теме диссертации и формулируются задачи диссертации.

Технология многоканальных передач (МКП) используется для обеспечения более высокой пропускной способности. Эта технология имеет ряд преимуществ, позволяющих ей достичь большей производительности, чем предшествующие технологии. В отличие от способов использования нескольких каналов из дополнений IEEE 802.11n/ac, в МКП нет необходимости получать доступ в так называемом основном канале, прежде чем использовать дополнительные каналы. Таким образом, перегрузка одного канала не приводит к блокировке остальных. Более того, расстояние между двумя каналами не ограничено сверху, а также сами каналы могут иметь разную ширину. В дополнение, поскольку для разных каналов используются разные радиointерфейсы, проблема высокого соотношения пиковой мощности к средней мощности сигнала менее выражена, чем при объединении каналов. В отличие от множественного доступа с ортогональным частотным разделением каналов (англ.: Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA), в МКП доступ к среде в каждом канале осуществляется независимо для ОПП МКУ (и с определенными ограничениями для НОПП МКУ). МКП способствует более быстрому переключению каналов, чем механизм FST (англ.: Fast Session Transfer — быстрое переключение сессии), описанный в дополнении IEEE 802.11ad. Кроме того, в отличие от FST, МКП позволяет использовать для обмена кадрами несколько каналов одновременно. Наконец, МКП обеспечивает раздельное управление каналами, в том числе выбор параметров передачи кадров, что особенно полезно, если условия в разных частях спектра различаются. Стоит заметить, что разделение трафика производится только на канальном уровне и ниже, что позволяет ускорить обслуживание потока данных даже от одного приложения.

МКУ имеет один интерфейс к верхнему подуровню управления логической связью (англ.: Logical Link Control, LLC) и включает в себя несколько *связанных устройств*, у каждого из которых имеется физический интерфейс к беспроводной среде в своем частотном канале. Подуровень управления доступом к среде (англ.: Medium Access Control, MAC) разделен на две части: High MAC и Low MAC, как показано на рисунке 1. High MAC обеспечивает функции управления для всего МКУ: присоединение и аутентификацию, управление

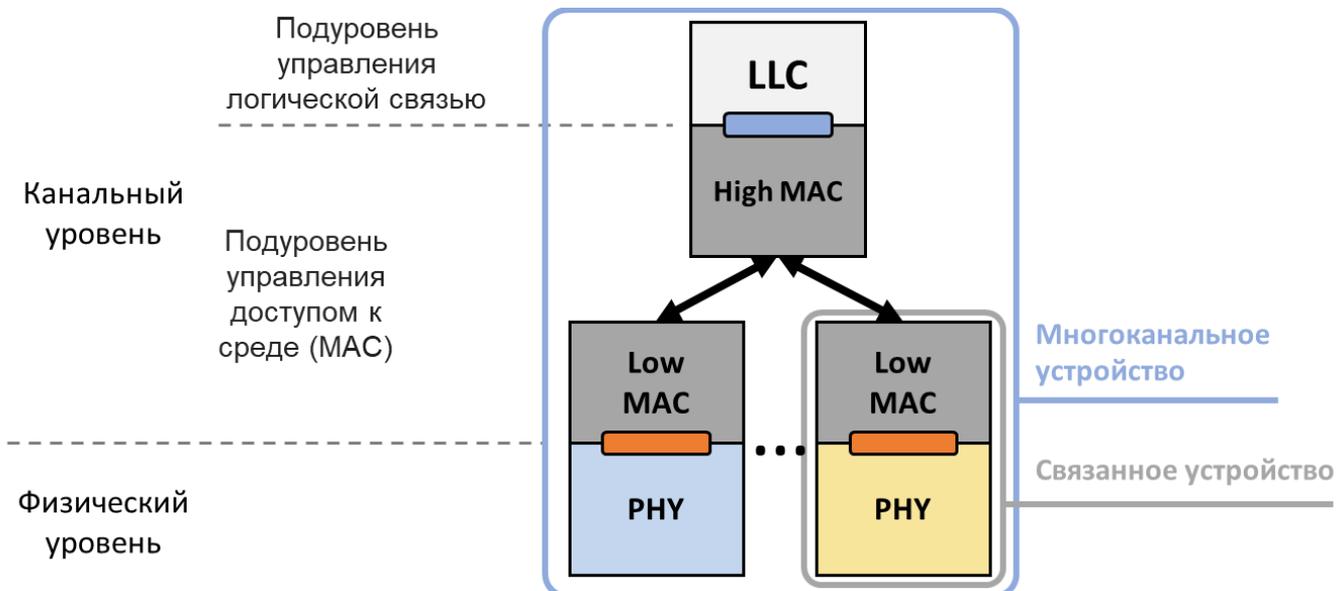


Рисунок 1. Диаграмма архитектуры МКУ со связанными устройствами

порядковыми номерами пакетов, их буферизацию, сбор и распределение по связанным устройствам. Экземпляры Low MAC на каждом связанном устройстве реализуют для соответствующих каналов такие функции, как доступ к среде, создание служебных кадров, инкапсуляцию пакетов в кадры, проверку заголовков и контрольной суммы и т. д.

По умолчанию все типы трафика обслуживаются с помощью всех каналов. Однако многоканальные устройства могут выделить отдельные каналы для некоторых типов трафика, чтобы повысить их качество обслуживания. Если некоторый трафик обслуживается несколькими каналами, то МКУ может передавать соответствующие пакеты в любом канале. Обмен служебными кадрами достаточно проводить в любом из обслуживающих этот трафик каналов. Аналогично можно сообщать о статусе приема кадров с помощью общего кадра блочного подтверждения (англ.: Block Acknowledgement, BlockAck) вне зависимости от канала, в котором пакеты переданы. Для такой работы МКУ используют общий буфер пакетов для каждого типа трафика, чтобы упорядочивать пакеты, обнаруживать дубликаты, запрашивать отсутствующие пакеты. Поскольку буфер общий для всех кадров одного типа трафика и номинальная пропускная способность в каждом канале больше, чем в предыдущем дополнении IEEE 802.11ax, в IEEE 802.11be его максимальный размер увеличен с 256 до 1024. Также позволено передавать до 1024 пакетов (англ.: MAC Protocol Data Unit, MPDU) в одном кадре.

В НОПП МКУ наблюдается межканальная интерференция, когда передающий интерфейс устройства создает наводки на принимающем интерфейсе, работающем в другом частотном канале. Мощность межканальной интерференции зависит от множества факторов, в частности мощности передачи, спектрального расстояния между каналами (разности их центральных частот) и расположения антенн в МКУ.

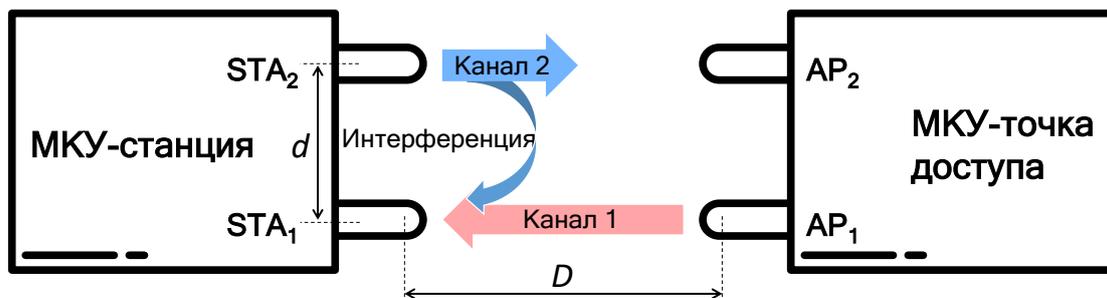


Рисунок 2. Схема эксперимента с использованием ПОР

Для НОПП МКУ в дополнении IEEE 802.11be описан специальный метод синхронного доступа к среде, который ограничивает работу связанных устройств для предотвращения интерференции. Во-первых, если НОПП МКУ осуществляет передачу в одном из каналов, соревнование за другие каналы становится невозможным, и счетчики отсрочки в этих каналах приостанавливаются до окончания передачи. Во-вторых, для одновременной передачи в нескольких каналах требуется, чтобы начала и окончания передаваемого сигнала от НОПП МКУ были синхронизованы. При таких ограничениях на НОПП МКУ никогда не возникнет одновременной передачи и приема. Однако для реализации метода синхронного доступа требуется налаживать дополнительные связи между различными экземплярами low MAC, что усложняет реализацию. Кроме того, такое ограничение приводит к уменьшению пропускной способности НОПП МКУ по сравнению с ОПП МКУ: чтобы совершить синхронную передачу необходимо, чтобы во всех каналах отсрочка была завершена, вероятность чего обычно мала. Несмотря на это, пропускная способность НОПП МКУ может быть увеличена за счет новых алгоритмов и методов множественного доступа МКУ, которые разработаны в диссертации.

Содержание первой главы изложено в работах [1–4].

**Во второй главе** решается первая задача диссертации — экспериментальное определение области применимости режима ОПП и разработка метода, расширяющего эту область. Представлено описание разработанных экспериментальных стендов, с помощью которых впервые изучается возможность современных устройств принимать данные одновременно с передачей в другом канале. Дана экспериментально обоснованная оценка возможности режима ОПП в мобильных МКУ разных габаритов. Представлен метод условной поддержки режима ОПП, который позволяет МКУ использовать одновременно прием и передачу даже при наличии межканальной интерференции.

Для решения первой задачи диссертации проведено две серии экспериментов, в которых используются (1) программно-определяемые радио (ПОР) и (2) современные мобильные устройства. Преимущество ПОР заключается в большей степени контроля параметров передачи: мощности передачи, сигнально-кодовой конструкции (СКК), центральных частот каналов и их ширин. Мобильные пользовательские устройства же позволяют более точно оценить качество приема

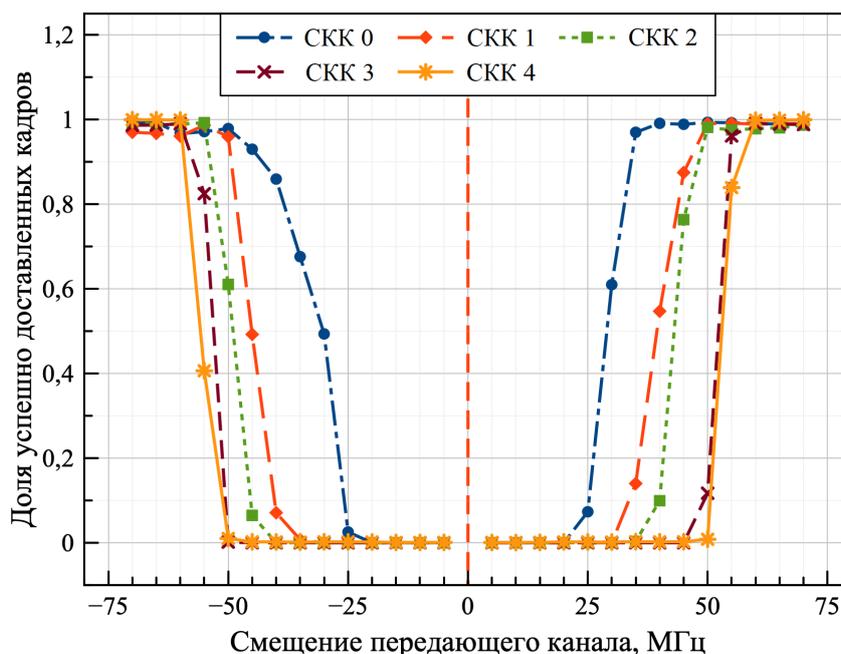


Рисунок 3. Зависимости успеха доставки кадров при разных СКК

сигнала, ожидаемое в реальных МКУ.

В первой серии экспериментов используются два ПОР USRP-2944R, оборудованные двумя радиоинтерфейсами, управляемыми независимо, как изображено на рисунке 2. Первое ПОР (МКУ-точка доступа) осуществляет беспроводную передачу данных в канале 1, а второе ПОР (МКУ-станция) принимает эти данные и одновременно передает данные в канале 2. В ходе экспериментов МКУ-точка доступа передает данные МКУ-станции в канале 1. Размер полезной нагрузки на канальном уровне составляет 1500 байт, и кадры передаются непрерывно. МКУ-станция также ведет постоянную передачу кадров, создавая условия для потенциальной межканальной интерференции.

Критерием для решения о возможности осуществления одновременного приема и передачи в диссертационной работе выбрано падение пропускной способности не более чем на 10% по сравнению с полным отсутствием межканальной интерференции.

Рассмотрим изображенные на рисунке 3 зависимости вероятности успеха доставки кадров от спектрального расстояния (разницы центральных частот каналов) между каналами 1 и 2 в диапазоне 5 ГГц. Использование каналов со спектральным расстоянием менее 50 МГц в режиме ОПП невозможно, кроме отдельных случаев с применением самой низкоскоростной СКК 0. При увеличении же спектрального расстояния уровень межканальной интерференции падает, и становится доступным использование все более высокоскоростных СКК. Обнаружено, что пропускная способность ПОР не уменьшается более чем на 10% по сравнению со случаем без интерференции, если спектральное расстояние между каналами не менее 60 МГц.

На основе дальнейших экспериментов сделан вывод, что режим ОПП

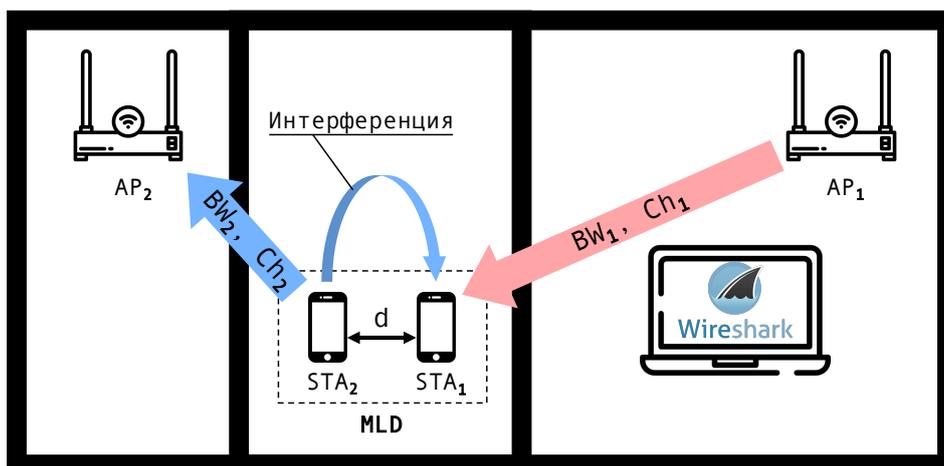
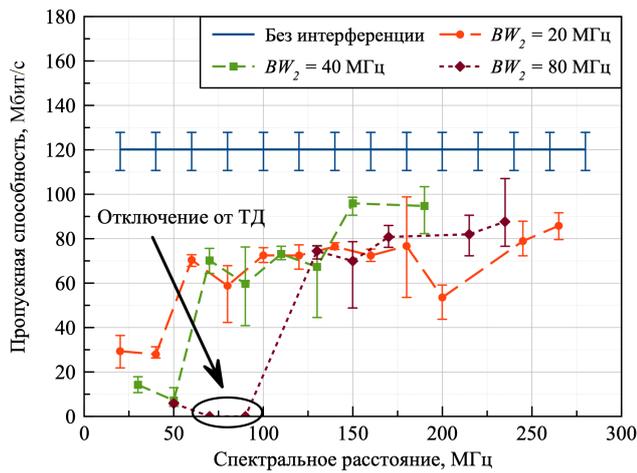


Рисунок 4. Схема эксперимента с использованием мобильных устройств

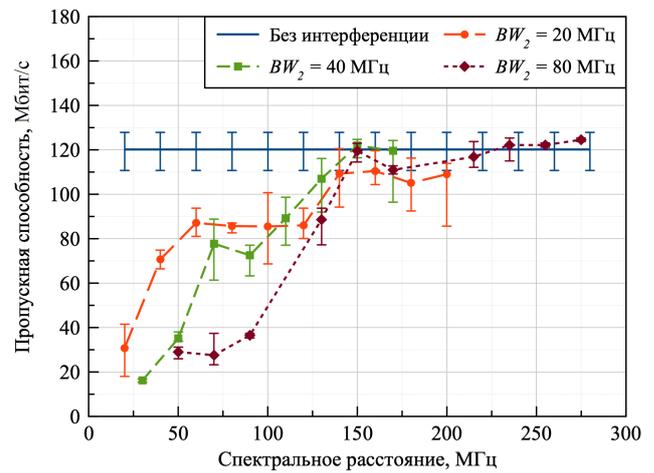
невозможен при использовании каналов только из диапазона 2,4 ГГц. Однако режим ОПП всегда возможен, если использовать один канал из диапазона 2,4 ГГц и другой из 5 ГГц или 6 ГГц. Кроме того, обнаружено, что при непараллельных антеннах уровень межканальной интерференции заметно снижается (до 12 дБ) за счет ортогональной линейной поляризации.

Во второй серии экспериментов делается эмуляция МКУ с помощью реальных точек доступа Wi-Fi ( $AP_1$  и  $AP_2$ ) и смартфонов ( $STA_1$  и  $STA_2$ ), подключенных к соответствующим точкам доступа в разных каналах. На рисунке 4 приведена схема экспериментальной установки. Для надлежащей эмуляции ОПП МКУ-точки доступа  $AP_1$  и  $AP_2$  удалены друг от друга так, чтобы предотвратить любую возможную межканальную интерференцию между ними. На точках доступа с помощью специального программного обеспечения генерируется UDP-трафик с максимальной поддерживаемой интенсивностью пакетов. На смартфонах эти пакеты принимаются, и считается число успешных доставок, а также время, затраченное на передачу. Для этого используется ноутбук с сетевой картой, позволяющей протоколировать время приема всех кадров IEEE 802.11, передаваемых в выбранном частотном канале. Используется отрезок частот от 5650 до 5845 МГц. Ширина  $BW_1$  канала 1 ( $Ch_1$ ), в котором передаются данные от  $AP_1$  на  $STA_1$ , равна 20 МГц, а ширина  $BW_2$  канала 2 ( $Ch_2$ ), передача в котором вызывает интерференцию, варьируется.

Проведены эксперименты с различными расстояниями  $d$  между  $STA_1$  и  $STA_2$ : серия №2а с  $d = 13,5$  см, что соответствует характерным расстояниям между антеннами в современных смартфонах, и серия №2б с  $d = 30$  см — характерное расстояние для ноутбуков и больших планшетов. Исследуемой в экспериментах величиной является пропускная способность канала 1, в котором  $STA_1$  принимает данные от  $AP_1$ . Критерием для решения о возможности осуществления одновременного приема и передачи выбрано падение пропускной способности не более чем на 10% по сравнению с полным отсутствием межканальной интерференции.



(а) Расстояние между смартфонами  $d = 13,5$  см



(б) Расстояние между смартфонами  $d = 30$  см

Рисунок 5. Зависимость пропускной способности канала 1 от спектрального расстояния

Зависимости средней пропускной способности от спектрального расстояния между центральными частотами каналов 1 и 2 для расстояния между смартфонами  $d = 13,5$  см представлены на рисунке 5, а. Влияние межканальной интерференции снижает пропускную способность более, чем 10% относительно значений, наблюдаемых в отсутствие интерференции, даже при значительном спектральном расстоянии до 300 МГц. В широком отрезке спектральных расстояний снижение пропускной способности варьируется в пределах 15–40%. Можно сделать вывод, что смартфоны не могут эффективно использовать каналы в диапазоне от 5650 до 5845 МГц в режиме ОПП без дополнительных архитектурных или протокольных решений.

Результаты при расстоянии между смартфонами  $d = 30$  см приведены на рисунке 5, б. При спектральном расстоянии 150 МГц и более, пропускная способность превышает уровень 90% от уровня, наблюдаемого в отсутствие интерференции. Можно сделать вывод, что использование режима ОПП возможно в ноутбуках и больших планшетах с каналами в диапазоне от 5650 до 5845 МГц. Размеры этих устройств позволяют расположить антенны на достаточно большом расстоянии друг от друга, чтобы минимизировать влияние межканальной интерференции.

Отметим, что при расстоянии  $d = 13,5$  см пропускная способность находится на уровне порядка 60% от максимального значения в широком диапазоне спектральных расстояний. Уменьшение пропускной способности обусловлено снижением скорости передачи со стороны точки доступа. В проведенных экспериментах уровень межканальной интерференции остается постоянным, поэтому алгоритм управления скоростью на точке доступа автоматически выбирает соответствующую СКК. Таким образом, повышается надежность передачи и достигается практически нулевая вероятность потери пакетов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что МКУ-станция может не только полностью поддерживать или не поддерживать режим ОПП, но и

функционировать в режиме ОПП при определенных условиях, а именно при повышенной надежности передачи в нисходящем канале. Для этого на практике МКУ-точке доступа необходимо оценивать снижение отношения сигнал-шум во время одновременной передачи и приема, чтобы в такие моменты понижать номер СКК. Существующие методы выбора СКК точки доступа не опираются на информацию об осуществлении одновременных передачи и приема и будут систематически выбирать низкую скорость передачи данных.

Предлагается метод условной поддержки режима ОПП (англ.: Conditional STR), применяя который, МКУ-станция сообщает МКУ-точке доступа о необходимости использовать СКК, соответствующую текущему отношению сигнал-шум, уменьшенному на некоторое указанное число децибел. Когда МКУ-станция будет передавать данные МКУ-точке доступа, последняя, в свою очередь, будет использовать СКК с более низким номером, чем обычно используется для передач. Это позволяет МКУ-станции использовать режим ОПП даже при наличии межканальной интерференции. В диссертационной работе описаны требуемые изменения в IEEE 802.11 для реализации условной поддержки режима ОПП.

Содержание и результаты второй главы опубликованы в работах [7–11, 13].

**В третьей главе** решается задача разработки и исследования алгоритма управления агрегацией кадров в ОПП МКУ для повышения их пропускной способности при ограниченном размере буфера пакетов. Созданный алгоритм управления агрегацией впервые учитывает ограниченность общего для всех каналов буфера пакетов.

Для агрегации нескольких пакетов, или MPDU, в один большой кадр (англ.: Aggregated MPDU, A-MPDU) они выбираются из специального скользящего окна BlockAck (англ.: BlockAck Window, BAW). BAW включает пакеты с номерами от  $WinStart$  до  $WinStart + W - 1$ . BAW сдвигается на  $N$  пакетов тогда и только тогда, когда  $N$  первых пакетов переданы успешно (или отброшены, что в работе не рассматривается). Пакеты внутри BAW могут быть в одном из трех состояний: *доставленные* — если пакет отправлен и его доставка подтверждена кадром BlockAck; *недоставленные* — если пакет еще не отправлен или BlockAck сообщил о потере; «*в эфире*» (англ.: in-flight) — если отправлен, но соответствующий BlockAck еще не получен. Когда МКУ необходимо создать кадр, из BAW выбираются несколько первых недоставленных пакетов по принципу FIFO (англ.: First In — First Out).

Пусть МКУ отправляет насыщенный поток данных другому МКУ в каналах 1 и 2, причем  $r_1$ ,  $r_2$  — скорости передачи данных (число пакетов за единицу времени), и  $p_1$ ,  $p_2$  — доля ошибок на пакет (англ.: Packet Error Rate, PER) в этих каналах. Число пакетов в секунду  $r$  можно вычислить, зная средний размер пакета  $P$  (бит), накладные расходы канального уровня  $V$  (бит) и номинальную скорость  $R$  (бит/с), по формуле  $r = R/(P + V)$ . В диссертации представлена модель процесса передачи, схематично изображенная на рисунке 6, где время в каждом канале делится на циклы. Цикл — это отрезок времени

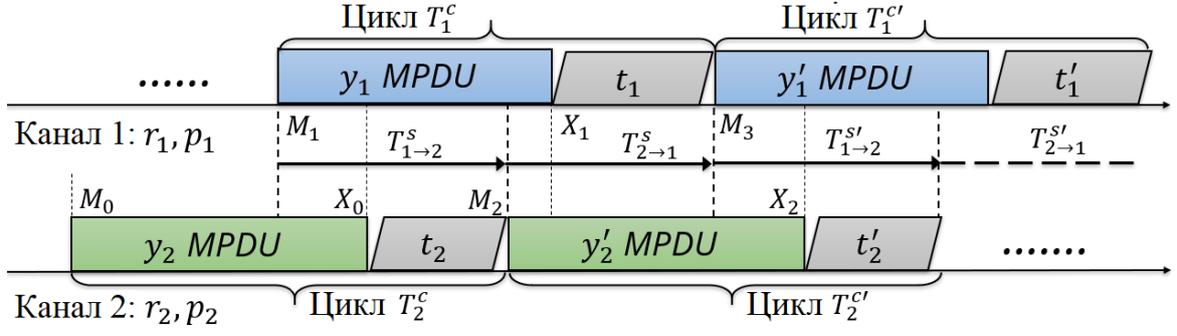


Рисунок 6. Временная диаграмма упрощенного процесса передачи

длительностью  $T^c$  между началами двух последовательных кадров. Для A-MPDU определим размер агрегации — число агрегированных в нем пакетов. Цикл состоит из передачи кадра с размером агрегации  $y$  пакетов и накладных расходов общей длительностью  $t$ . Если пренебречь длительностью разделителей пакетов (англ.: MPDU delimiter) и дозаполнения нулями в конце каждого пакета, то можно положить, что все накладные расходы цикла происходят после передачи кадра. Предположим также, что BlockAck доставляются немедленно после передачи кадра. Кроме того, пренебрежем случайным характером величины  $t$ , вызванным случайной отсрочкой, и будем рассчитывать  $t$  исходя из средней продолжительности отсрочки.

Для упрощения анализа рассматриваются только алгоритмы агрегации, при которых длительности всех циклов на обоих каналах постоянны и равны:  $T_1^c = T_2^c \triangleq T^c$ . Поскольку цикл состоит из части передачи данных и накладных расходов, его длительность равна  $T^c = y_1/r_1 + t_1$ . Следовательно, размер агрегации  $y_1 = (T^c - t_1) \cdot r_1$  — тоже величина постоянная. Аналогичные формулы справедливы для канала 2.

Введем сдвиг  $T_{i \rightarrow j}^s$ , время от начала кадра в канале  $i$  до начала следующего кадра на канале  $j$ . Так как длительности циклов на обоих каналах постоянны и равны, то сдвиги постоянны, но не обязательно равны. Из определения сдвигов вытекает следующее свойство:

$$T_{i \rightarrow j}^s + T_{j \rightarrow i}^s = T^c. \quad (1)$$

В диссертационной работе в рамках описанных условий сформулирована и доказана следующая теорема.

**Теорема 1.** При отсутствии потерь пакетов ( $p_1 = p_2 = 0$ ) и постоянных накладных расходах  $t_1$  и  $t_2$ , таких, что размер скользящего окна  $W > r_2 t_1 + r_1 t_2$ , двухканальная МКУ достигает максимальной пропускной способности, когда размеры агрегации в канале 1 и сдвиги между циклами удовлетворяют условиям

$$y_1 = \frac{r_1 r_2^2 t_2 + (W - r_2 t_1) (r_1^2 + r_1 r_2)}{r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2}, \quad (2)$$

$$T_{2 \rightarrow 1}^s = \frac{W r_1 + (r_1^2 + r_2^2) t_1 - r_1^2 t_2}{r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2}. \quad (3)$$

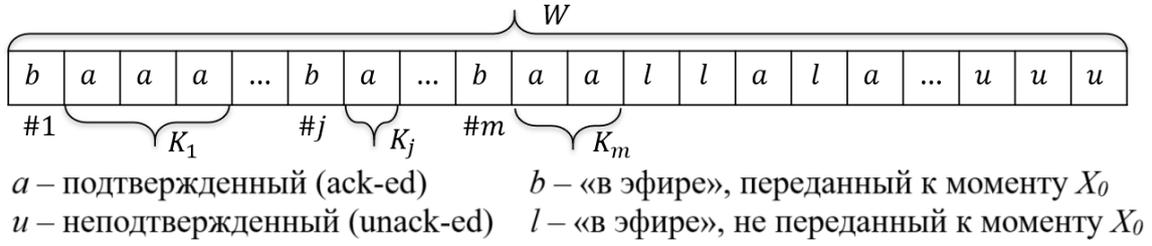


Рисунок 7. Диаграмма структуры BAW в момент  $M_1$  начала передачи кадра

Доказательство теоремы приведено в третьей главе. Нетрудно показать, что выражения (2) и (3) справедливы при замене индексов  $1 \leftrightarrow 2$ .

В случае с потерями пакетов доставленные и недоставленные пакеты перемешаны внутри BAW, как показано на рисунке 7. Это затрудняет продвижение окна, так как не позволяет вытеснить из BAW доставленные пакеты, которые следуют за пакетами недоставленными или «в эфире». Чтобы в алгоритме учесть этот эффект, вводится эффективный размер  $w$ , равный ожидаемому числу пакетов, которые могут быть отправлены, т. е. сумме числа недоставленных пакетов и числа пакетов «в эфире». В диссертационной работе предложена и обоснована следующая формула для оценки  $w$ :

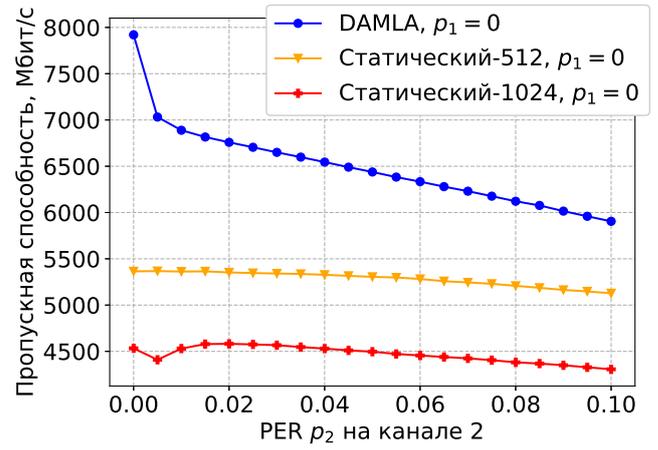
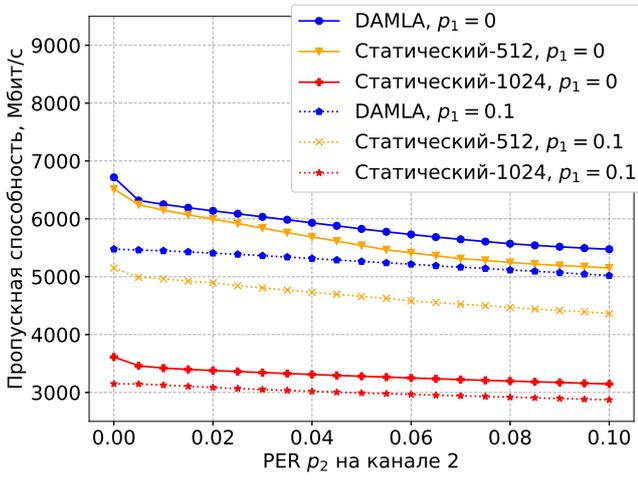
$$w = \sum_{i=1}^m \left( (K_i + 1) \prod_{j=1}^i (1 - p_{I(j)}) \right) + D_1 p_1 + D_2 p_2 + L + U, \quad (4)$$

где  $I(j) \in \{1, 2\}$  — номер канала, в котором передается  $j$ -тый пакет «в эфире»,  $K_j$  — количество последовательных подтвержденных пакетов после  $j$ -того пакета «в эфире»,  $D_1, D_2$  — количество пакетов «в эфире» в каналах 1 и 2, переданных до момента  $X_0$ ,  $L$  — общее количество пакетов «в эфире», еще не переданных к моменту  $X_0$ ,  $U$  — количество неподтвержденных пакетов.

В диссертации предлагается алгоритм управления агрегацией DAMLA (англ.: Dynamic Algorithm for Multi-Link Aggregation), который запускается в момент  $M_i$  непосредственно до начала передачи кадра. Без потери общности, пусть алгоритм запускается в момент  $M_1$  в канале 1 (как изображено на рисунке 6). Тогда он работает следующим образом. Во-первых, оценивается эффективный размер BAW  $w$ . Во-вторых, оцениваются постоянные  $t_1, t_2$  усреднением длительностей накладных расходов. В-третьих, вычисляется текущий сдвиг  $T_{1 \rightarrow 2}^s = M_2 - M_1$ . В-четвертых, по формуле из Теоремы 1 с заменой  $W$  на  $w$  вычисляется требуемый сдвиг  $T_{2 \rightarrow 1}^{s*}$ . В-пятых, вычисляется размер агрегации  $y_1^*$  для требуемого сдвига по формуле

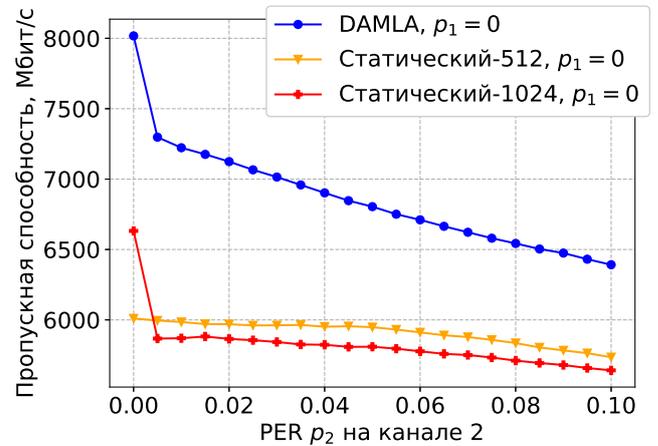
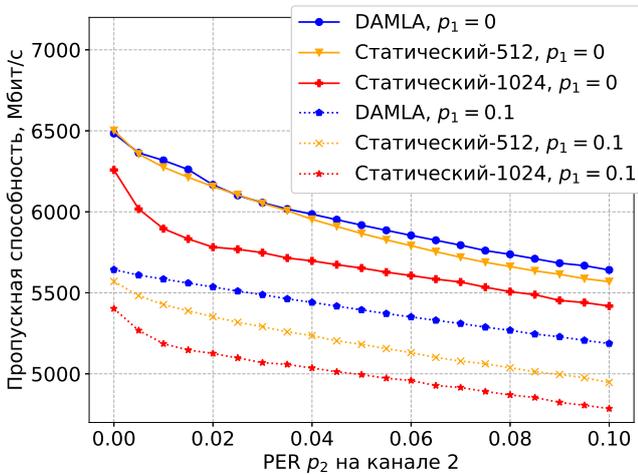
$$y_1^* = \lceil T_{2 \rightarrow 1}^{s*} + \max\{0, T_{2 \rightarrow 1}^{s*} - t_1\} \rceil r_1, \quad (5)$$

где  $\lceil \cdot \rceil$  — оператор округления вверх. Если в BAW доступно менее чем  $y_1^*$  пакетов, то в A-MDPU включаются все доступные пакеты. Все пояснения приведены в диссертации. Следует подчеркнуть, что если длительность накладных расходов будет постоянна, а вероятность потери пакетов в обоих каналах будет нулевой,



(а)  $TXOP_{limit}$  не установлен,  $r_1 = 4$  Гбит/с,  $r_2 = 4$  Гбит/с

(б)  $TXOP_{limit}$  не установлен,  $r_1 = 2$  Гбит/с,  $r_2 = 8$  Гбит/с



(в)  $TXOP_{limit} = 3$  мс,  $r_1 = 4$  Гбит/с,  $r_2 = 4$  Гбит/с

(г)  $TXOP_{limit} = 3$  мс,  $r_1 = 2$  Гбит/с,  $r_2 = 8$  Гбит/с

Рисунок 8. Зависимость пропускной способности МКУ от доли потерянных пакетов в канале 2 ( $p_2$ )

то, согласно Теореме 1, с точностью до 1 пакета такой алгоритм будет выбирать оптимальные размеры агрегации для максимизации пропускной способности ОПП МКУ.

В диссертационной работе представлены полученные с помощью моделирования в среде имитационного моделирования NS-3 зависимости пропускной способности ОПП МКУ с конечным размером BAW от доли потерянных пакетов в канале 2 ( $p_2$ ). При моделировании используется насыщенный поток данных. Результаты, приведенные на рисунке 8, позволяют сравнить предложенный алгоритм управления агрегацией с базовыми решениями Статический-512 и Статический-1024, которые всегда используют размер агрегации 512 и 1024 пакетов соответственно.

Рассмотрим производительность алгоритмов агрегации на рисунке 8(а), в случае, когда скорости одинаковы в обоих каналах. Предложенный алгоритм превосходит оба базовых решения. В частности, при  $p_1 = 0,1$ ,  $p_2 = 0,1$  прирост пропускной способности по сравнению с алгоритмом Статический-512,

лучшим из базовых решений, составляет около 16%. Прирост достигается за счет предварительного уменьшения размера агрегации при малом количестве доступных для передачи кадров. Так алгоритм избегает нехватки пакетов в другом канале.

Предложенный алгоритм также более эффективен в случае разных скоростей в каналах, как показано на рисунке 8(б), что обеспечивается учетом скоростей при размере агрегации. За счет этого предложенный алгоритм неравномерно распределяет пакеты по каналам, увеличивая пропускную способность на 50% по сравнению с алгоритмом Статический-512.

Превосходство предложенного алгоритма наблюдается и при использовании механизма ТХОР (англ: transmission opportunity — возможность передачи), см. рисунки 8(в), 8(г). С механизмом ТХОР станция может занять канал виртуально для передачи нескольких кадров сразу, тем самым он служит для сокращения накладных расходов. Общая длительность промежутка времени ТХОР не должна превышать величину  $TXOR_{limit}$ , зависящую от категории доступа. С одной стороны, с использованием ТХОР средняя длительность накладных расходов  $t$  за цикл уменьшается. С другой стороны, последний кадр внутри занятого промежутка времени ТХОР ограничивается по длительности и по размеру агрегации. В предложенном алгоритме это явно не учитывается. Тем не менее, результаты показывают прирост в 5% и 23% по сравнению с алгоритмом Статический-512 в случаях с одинаковыми и разными скоростями, соответственно.

Содержание и результаты третьей главы опубликованы в работе [5].

**В четвертой главе** представлен алгоритм управления механизмом доступа к среде для НОПП МКУ в Wi-Fi 7, адаптивный к изменению загрузки каналов. Алгоритм повышает пропускную способность МКУ, в том числе при наличии в сети одноканальных устройств. Это первый алгоритм управления механизмом доступа к среде НОПП МКУ в Wi-Fi 7, который учитывает доступную на практике информацию, такую как емкости каналов, среднюю пропускную способность, число одноканальных устройств (ОКУ) (англ.: Single-Link Device, SLD) в каждом канале и интенсивность их трафика.

Пусть НОПП МКУ соревнуется за доступ к среде и отсрочка по методу улучшенного распределенного доступа к каналу (англ.: Enhanced Distributed Channel Access, EDCA) завершается в любом из каналов. Согласно дополнению IEEE 802.11be, можно выполнить одно из трех действий: *отказаться от передачи*, т. е. утратить доступ к среде и инициировать новую процедуру отсрочки без изменения размера конкурентного окна (англ.: Contention Window, CW); *немедленно передать* в одном канале или синхронно в нескольких каналах, если отсрочка в них завершилась одновременно; *ожидать* истечения счетчиков отсрочки в других каналах. В последнем случае, если в период ожидания хотя бы в одном канале среда становится занятой, счетчик отсрочки перезапускается без изменения размера CW. Иначе, если отсрочка в другом канале завершается, выполняется синхронная передача.

В диссертации рассматривается набор из четырех базовых алгоритмов, основанных на решениях из предыдущих исследований: NoWaiting, Waiting, SingleLink и SingleLink+. По алгоритму *NoWaiting* МКУ, получив доступ к среде, немедленно передает. Синхронные передачи становятся редкими, но потеря доступа при ожидании и простой отсутствуют.

Алгоритм *Waiting* функционирует следующим образом. Если отсрочка истекла в одном канале и есть хотя бы один другой свободный канал, в котором отсрочка не истекла, устройство ожидает окончания отсрочки в этом канале. Если отсрочка завершилась во всех свободных каналах (возможно только в одном, если остальные заняты) устройство выполняет немедленную передачу. В отличие от NoWaiting, с алгоритмом *Waiting* число синхронных передач значительно больше.

Для алгоритма *SingleLink* определен основной канал, а остальные являются второстепенными. МКУ считает отсрочку во всех каналах. Если истекла отсрочка в основном канале, то НОПП МКУ осуществляет немедленную передачу в этом канале, а также в тех вспомогательных, которые свободны и в которых отсрочка истекла в тот же момент. Таким образом, алгоритм *SingleLink*, как правило, чаще задействует основной канал. Этот алгоритм следует использовать вместо NoWaiting или Waiting, только когда емкость (максимальная пропускная способность канала с учетом накладных расходов) или загруженность каналов различаются.

В качестве улучшенного алгоритма рассматривается *SingleLink+*, в котором устройство не отказывается от передачи во второстепенном канале, а ожидает в нем. Это позволяет чаще совершать синхронные передачи, чем SingleLink.

В четвертой главе диссертационной работы проведено предварительное исследование, в котором показано, что каждый из базовых алгоритмов эффективен лишь в части сценариев работы сети Wi-Fi, состоящей из МКУ и нескольких ОКУ. В частности, наибольшую пропускную способность в зависимости от сценария демонстрируют алгоритмы Waiting и SingleLink+. Алгоритм Waiting показывает лучший результат при низкой интенсивности трафика от ОКУ, тогда как SingleLink+ превосходит его при насыщенном трафике ОКУ, особенно когда емкости каналов сильно различаются.

Для повышения производительности НОПП МКУ в сценариях, где условия в каналах меняются со временем, предложен адаптивный алгоритм (Adaptive). Этот алгоритм, в зависимости от текущих условий, переключается между двумя базовыми алгоритмами — Waiting и SingleLink+, которые в дальнейшем называются режимами алгоритма Adaptive.

В диссертации рассматривается алгоритм Adaptive для МКУ, работающего в каналах  $i \in \{1, 2\}$ . Номер канала, отличного от  $i$ , определим как  $\bar{i} = 3 - i$ . Используются записи (SingleLink,  $i$ ) и (SingleLink+,  $i$ ) для обозначения соответствующих алгоритмов с основным каналом  $i$ .

Алгоритм Adaptive работает согласно блок-схеме, изображенной на рисунке 9. НОПП МКУ запускает алгоритм Adaptive в момент получения

доступа к среде в каком-либо из каналов, но не чаще, чем раз в  $T$ . Входными параметрами для работы алгоритма являются текущий режим работы (Waiting или SingleLink+) и, в случае SingleLink+, номер основного канала  $i^{cur}$ , емкости двух каналов  $C_i$ , количество работающих в каналах ОКУ  $N_i^{SLD}$  и текущая пропускная способность НОПП МКУ  $S^{cur}$ . Кроме того, для оценки пропускной способности НОПП МКУ в режиме Waiting используется доля времени  $\eta_i$ , занятого чужими передачами. Также алгоритм учитывает, является ли сторонний трафик ОКУ насыщенным, поскольку, например, SingleLink+ превосходит режим Waiting при насыщенном трафике ОКУ, особенно когда емкости каналов сильно различаются.

Емкости каналов  $C_i$  считаются известными из используемых параметров передачи, таких как СКК и ширина канала. МКУ считает трафик ОКУ в канале  $i$  насыщенным, если длительность  $L_i^{cur}$  цепочки подряд идущих пустых слотов отсрочки между сторонними передачами превосходит порог  $L^{TH}$ . В случае ненасыщенного трафика ОКУ велика вероятность, что долгое время ОКУ не передают, и цепочка будет длинной. В качестве порогового значения выбрана длина  $L^{TH} = k \cdot CW_{min}$ , где  $CW_{min} = 16$  — минимальный размер CW, а постоянная  $k = 4$  подобрана эмпирически. При  $k < 4$  наблюдаются многочисленные избыточные переключения режимов, а при  $k > 4$  велика задержка при обнаружении изменения в интенсивности стороннего трафика. Если  $L_i^{cur} > L^{TH}$ , то считается, что трафик ОКУ в канале  $i$  ненасыщенный. Следует отметить, что такой способ определения насыщения чувствителен к ложному обнаружению. Даже когда у всех ОКУ в канале насыщенный трафик, возможна ситуация, когда длина цепочки оказалась велика, например, из-за нескольких коллизий и краткосрочного увеличения размера CW на ОКУ. Однако в этом случае такое поведение допустимо, поскольку, согласно блок-схеме, это условие будет дополнительно проверено сравнением пропускных способностей.

Текущая пропускная способность вычисляется по формуле  $S^{cur} = D/T$ , где  $D$  — объем данных, переданных за последний отрезок времени  $T$ . Число активных ОКУ  $N_i^{SLD}$  получается пересчетом уникальных отправителей кадров данных и получателей кадров подтверждений за время  $T$ . Чтобы оценить долю времени  $\eta_i$ , когда чужих передач нет, НОПП МКУ слушает каналы. В силу возникающей интерференции прослушивание возможно, только когда НОПП МКУ не передает. Обозначим время, затраченное за период  $T$  на прослушивание, как  $T^{listen}$ . Во время прослушивания канал  $i$  будет занят в течение времени  $T_i^{busy}$ . Тогда  $\eta_i = 1 - T_i^{busy}/T^{listen}$ . Отметим, что величина  $\eta_i$  используется только в случае непустых обоих каналов, как раз когда часто передают ОКУ. В такие моменты МКУ прослушивает канал без межканальной интерференции и уточняет оценку  $\eta_i$ , так что она в итоге почти не отличается от истинного значения.

В алгоритме также используются оценки пропускных способностей в различных режимах. Оценки помечаются символом «\*», если один из каналов *пустой*, т. е. в нем ОКУ не ведут передачи.

Пусть НОПП МКУ работает в режиме (SingleLink+,  $i$ ). Тогда можно

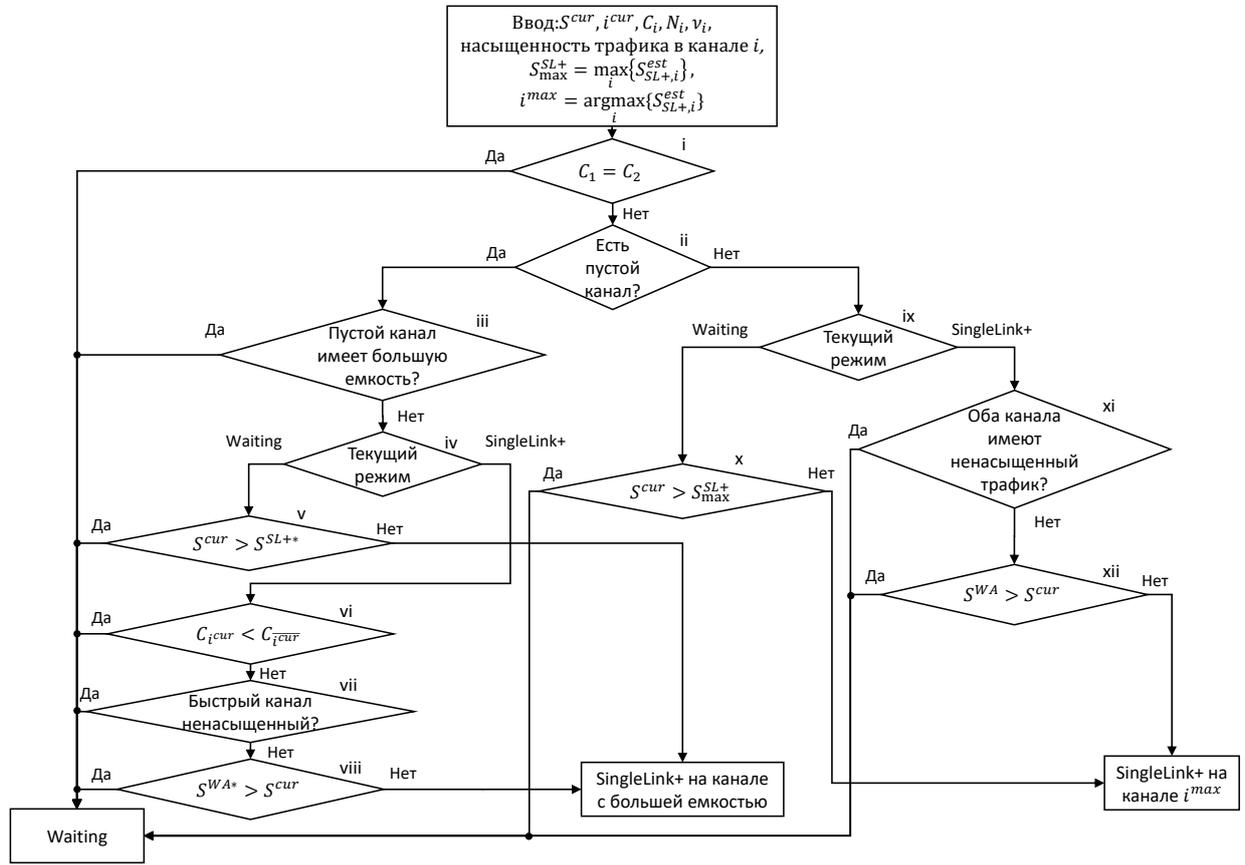


Рисунок 9. Блок-схема адаптивного алгоритма управления доступом НОПП МКУ

положить, что все станции ОКУ и НОПП МКУ делят время канала равномерно в условиях высокой нагрузки. Также положим, что время, занятое коллизиями, пренебрежимо мало, что возможно, например, если нет скрытых станций и число станций  $N_i^{SLD}$  невелико или используется механизм Request-To-Send/Clear-To-Send (RTS/CTS). Тогда справедлива оценка пропускной способности  $S_i^{SL+}$  в режиме SingleLink+ с основным каналом  $i$ :

$$S_i^{SL+} = \frac{C_i}{N_i^{SLD} + 1}. \quad (6)$$

Если в режиме (SingleLink+,  $i$ ) второстепенный канал  $\bar{i}$  пустой, то почти все передачи будут синхронными: при каждой передаче в основном канале  $i$  будет возможна передача и в другом пустом канале. Тогда справедлива оценка пропускной способности:

$$S_i^{SL+*} = \frac{C_1 + C_2}{N_i^{SLD} + 1}. \quad (7)$$

Если в режиме Waiting пустых каналов нет, то предположим, что МКУ будет передавать в канале  $i$ , когда он не занят чужими передачами. Тогда справедлива оценка:

$$S^{WA} = C_1\eta_1 + C_1\eta_2. \quad (8)$$

Если в режиме Waiting канал  $i$  пустой, а трафик ОКУ в канале  $\bar{i}$

насыщенный, то МКУ будет передавать кадры преимущественно в пустом канале  $i$ . Тогда справедлива оценка пропускной способности:

$$S^{WA*} = C_i. \quad (9)$$

Отметим, что в силу случайности доступа к среде число переданных кадров за время  $T$  флуктуирует, как и значение  $S^{cur}$ . Это может привести к краткосрочному снижению  $S^{cur}$  ниже одного из порогов и, как следствие, нежелательной смене режима. Требуется избежать этого, но сохранить возможность быстрого переключения при изменениях сценария, таких как обновление числа ОКУ в сети. Для этого в алгоритме Adaptive меняется режим тогда, когда при сравнении оценка пропускной способности в новом режиме  $S^{est} > S^{cur} + \min\{\Delta S^{cur}, \alpha S^{cur}\}$ , где  $\Delta S^{cur}$  — максимальное отклонение пропускной способности от среднего значения  $S^{cur}$  в течение окна  $T$ ,  $\alpha$  — параметр, ограничивающий  $\Delta S^{cur}$ .

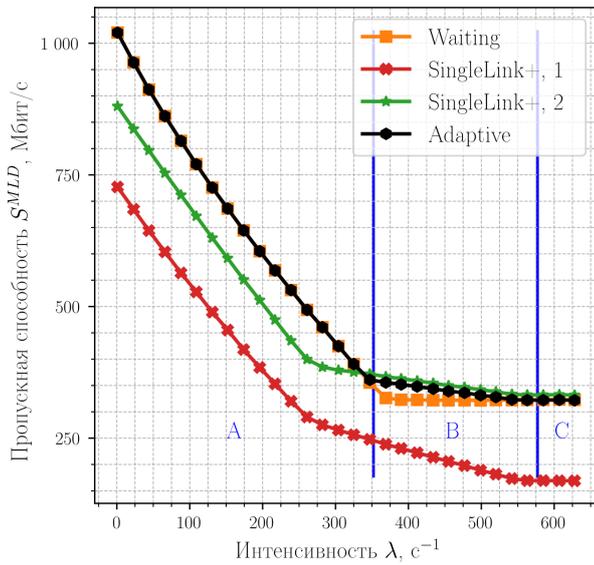
На рисунке 10 представлены зависимости пропускной способности НОПП МКУ от интенсивности стороннего трафика одноканальных устройств в сети. В результате сравнения режимов в диссертации сделан ряд выводов. Во-первых, Waiting не уступает SingleLink+ по пропускной способности, если каналы имеют равные емкости. Во-вторых, Waiting также не уступает (SingleLink+,  $i$ ), если один из каналов  $i$  пустой и он имеет большую емкость. В третьих, Waiting строго превосходит SingleLink+, если трафик ОКУ в обоих каналах ненасыщенный (зона А). В четвертых, SingleLink+ может превосходить Waiting, при насыщенном трафике ОКУ в двух каналах с различными емкостями, например, в зоне С на рисунках 10 (в), (г). В последнем случае синхронные передачи практически не происходят, и выгоднее использовать только один канал с большей пропускной способностью.

На рисунке 10 также видно, что алгоритм Adaptive использует преимущества SingleLink+ и Waiting в разных статичных сценариях, т. е. демонстрирует наилучшую пропускную способность по сравнению с базовыми алгоритмами почти в каждом частном сценарии. Его производительность может незначительно снижаться только в зоне В, когда он не совершает переход из SingleLink+ в более производительный режим Waiting. Однако это происходит лишь при незначительном отличии производительностей режимов и в узком круге сценариев, когда емкости каналов не равны, а число устройств в сети мало, и интенсивность их трафика постоянно находится в небольшом отрезке значений (в зоне В).

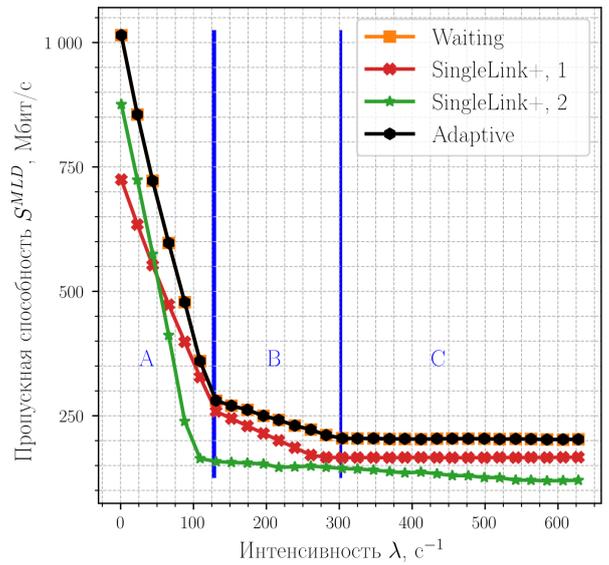
Также в диссертации рассмотрена зависимость текущей пропускной способности от времени при скачкообразном изменении интенсивности стороннего трафика. Алгоритм Adaptive также показывает результаты не хуже, чем лучший из базовых алгоритмов. Задержка адаптации алгоритма при смене условий ограничена длительностью окна  $T$ , но может быть и меньше этой величины.

**В заключении** приводятся выводы и основные результаты работы.

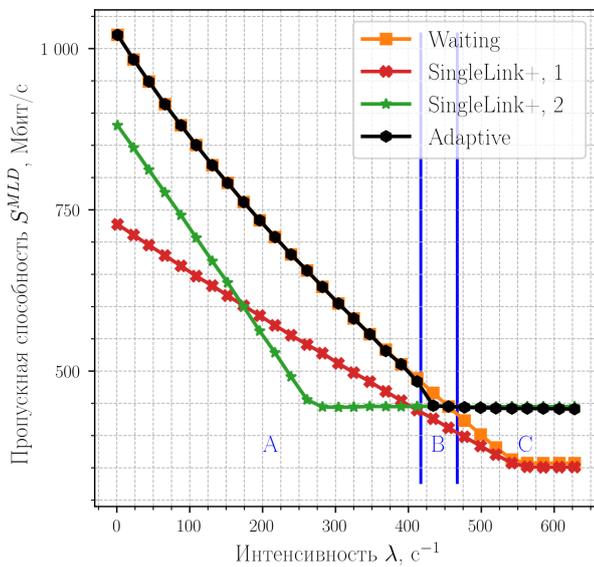
**В приложение** включены акты о внедрении результатов диссертации.



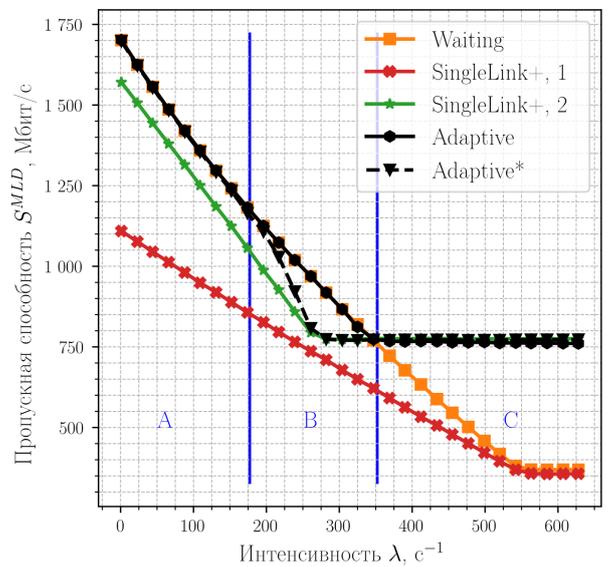
(а)  $\frac{C_2}{C_1} = 2, N_1^{SLD} = 1, N_2^{SLD} = 1$



(б)  $\frac{C_2}{C_1} = 2, N_1^{SLD} = 1, N_2^{SLD} = 4$



(в)  $\frac{C_2}{C_1} = 2, N_1^{SLD} = 0, N_2^{SLD} = 1$



(г)  $\frac{C_2}{C_1} = 4, N_1^{SLD} = 0, N_2^{SLD} = 1$

Рисунок 10. Зависимости пропускной способности МКУ от интенсивности трафика каждой ОКУ

## Основные результаты

- Предложен метод условной поддержки режима ОПП, позволяющий НОПП МКУ работать в режиме ОПП за счет изменения параметров принимаемого сигнала. В частности, на смартфоне метод позволил снизить требуемое спектральное расстояние для режима ОПП с более чем 250 МГц до 100 МГц.
- Доказана теорема об оптимальной по пропускной способности работе алгоритма управления агрегацией для ОПП МКУ с ограниченным размером буфера пакетов в сценариях с пакетами постоянной длины, без потерь пакетов и с постоянными накладными расходами.
- С учетом доказанной теоремы разработан алгоритм управления размером

агрегации, работающий в условиях с потерями пакетов и переменными накладными расходами. Предложенный адаптивный алгоритм может улучшить пропускную способность на 50% по сравнению с базовыми решениями.

- Разработан и исследован алгоритм управления доступом к среде для НОПП МКУ. Особенность алгоритма заключается в адаптации к изменению параметров каналов и их загрузки другими устройствами в сети. В большинстве сценариев он обеспечивает наилучшую среди базовых алгоритмов пропускную способность. Производительность алгоритма может незначительно снижаться относительно лучшего базового алгоритма в сценариях, где производительности двух используемых режимов близки.

## Список публикаций

1. Korolev Nikolay, Levitsky Ilya, Startsev Ivan et al. Study of Multi-link Channel Access Without Simultaneous Transmit and Receive in IEEE 802.11be Networks // IEEE Access. 2022. Vol. 10. Pp. 126339–126351.
2. Korolev Nikolay, Levitsky Ilya, Khorov Evgeny. Analytical Model of Multi-link Operation in Saturated Heterogeneous Wi-Fi 7 Networks // IEEE Wireless Communications Letters. 2022. Vol. 11, no. 12. Pp. 2546–2549.
3. 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. Pp. 88664–88688.
4. Khorov Evgeny, Levitsky Ilya. Current Status and Challenges of Li-Fi: IEEE 802.11bb // IEEE Communications Standards Magazine. 2022. Vol. 6, no. 2. Pp. 35–41.
5. Paroshin Vladislav, Levitsky Ilya, Loginov Vyacheslav, Khorov Evgeny. Aggregation Algorithm to Increase Throughput of Multi-link Wi-Fi 7 Devices // IEEE Wireless Communications Letters. 2024. Vol. 13, no. 12. Pp. 3484–3487.
6. Банков Д.В., Богданов Е.С., Левицкий И.А. и др. Исследование адаптивного алгоритма управления ожиданием при доступе к среде в сетях IEEE 802.11be // Информационные процессы. 2023. Т. 23, № 4. С. 642–651. (Перевод: Bankov, D. V., Bogdanov, E. S., Levitsky, I. A., Loginov, V. A., Khorov, E. M. Study of an Adaptive Waiting Control Algorithm for Channel Access in IEEE 802.11be Networks // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2024.).
7. Levitsky Ilya, Okatev Yaroslav, Khorov Evgeny. Study on Simultaneous Transmission and Reception on Multiple Links in IEEE 802.11be Networks // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T) / IEEE. 2020. Pp. 1–4.
8. Levitsky Ilya, Okatev Yaroslav, Khorov Evgeny. Feasibility of Simultaneous Transmit and Receive in Wi-Fi 7 Multi-link Devices // Proceedings of the Twenty-Third International Symposium on Theory, Algorithmic Foundations, and Protocol Design for Mobile Networks and Mobile Computing. 2022. Pp. 293–294.

9. Левицкий И.А., Окатьев Я.Е. Исследование возможности использования нескольких каналов Wi-Fi в дуплексном режиме // Информационные технологии и системы 2020 (ИТиС 2020). 2020. Рр. 155–168.
10. Левицкий И.А., Окатьев Я.Е. Исследование возможности использования асинхронной многоканальной передачи мобильными устройствами Wi-Fi // Информационные технологии и системы 2021 (ИТиС 2021). 2022. Рр. 117–130.
11. Левицкий И.А., Окатьев Я.Е. Исследование возможности использования асинхронной многоканальной передачи мобильными устройствами в сетях Wi-Fi // Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Радиотехника и компьютерные технологии. 2022. Рр. 117–130.
12. Богданов Е.С., Левицкий И.А. Адаптивный алгоритм управления ожиданием при доступе к среде для многоканальных устройств Wi-Fi 7 // Информационные технологии и системы 2023 (ИТиС 2023). 2023. Рр. 284–286.
13. Khorov Evgeny, Bankov Dmitry, Levitsky Ilya, Okatev Yaroslav. Conditional STR – CID 13212 // Doc: IEEE 802.11-21/1887r1. 2022. — July.