

Обзорная статья

УДК 004.725.5

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-2-64-72>

EDN:ARIEBU



Анализ проблем проектирования сетей Wi-Fi в свете перехода к восьмому поколению технологии

✉ Светлана Алексеевна Скоробогатова, skorobogatova.sa@sut.ru

✉ Антон Сергеевич Викулов, vikulov.as@sut.ru

✉ Александр Иванович Парамонов, paramonov@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность работы обуславливается широким распространением сетей стандарта IEEE 802.11. В статье рассматриваются ключевые нововведения, связанные с переходом от седьмого поколения стандарта Wi-Fi IEEE 802.11be, известного как Wi-Fi 7, к восьмому поколению стандарта IEEE 802.11bn, получившему название Wi-Fi 8. В частности, акцент сделан на улучшениях пропускной способности, внедрении более совершенных методов модуляции и поддержке многоканальных передач, что позволяет значительно повысить скорость и стабильность соединений. Восьмое поколение стандарта должно привести принципиально новые подходы к организации взаимодействия между клиентским устройством и точкой доступа. В отличие от 802.11be, в 802.11bn предполагается реализация возможности одновременной работы одного клиента с несколькими точками доступа, и наоборот, что принципиально изменит большинство существующих механизмов управления радиосредой, но то же время обеспечит недостижимую ранее потенциальную непрерывность работы в рамках распределенной в пространстве беспроводной инфраструктуры. Рассматриваются также актуальные задачи, стоящие перед индустрией, включая проблему совместимости с предыдущими поколениями стандартов и сложности, возникающие при проектировании беспроводных локальных вычислительных сетей.

Целью данной работы является систематизированный обзор основных особенностей последнего дополнения стандарта IEEE 802.11be, известного как Wi-Fi 7, и разрабатываемого в настоящий момент следующего поколения IEEE 802.11bn, получившего название Wi-Fi 8.

Методы: анализ профессиональной и научной литературы, текстов стандартов и практики их использования в отрасли.

В ходе **решения** поставленной задачи в работе представлен обзор основных улучшений, ожидаемых в стандарте IEEE 802.11bn. Особое внимание уделяется изменению подходов к проектированию беспроводных локальных вычислительных сетей в контексте новых технологий, таких как Distributed Multi-Link Operation и Multi-AP Coordination.

Теоретическая значимость состоит в анализе основных аспектов нововведений IEEE 802.11be и IEEE 802.11bn. Обозначены научные проблемы, которые требуют переработки и усложнения существующих моделей и методов. К ним относятся: динамическое распределение ресурсов в многодиапазонных сетях, оптимизация использования спектрального ресурса, развитие алгоритмов управления радиоресурсами, развитие алгоритмов обеспечения хендвера.

Практическая значимость: полученный результат может быть использован при постановке задач проектирования сетей Wi-Fi седьмого и восьмого поколений.

Ключевые слова: Wi-Fi 7, Wi-Fi 8, проектирование сетей Wi-Fi

Ссылка для цитирования: Скоробогатова С.А., Викулов А.С., Парамонов А.И. Анализ проблем проектирования сетей Wi-Fi в свете перехода к восьмому поколению технологии // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 2. С. 64–72. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-2-64-72. EDN:ARIEBU

Review research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-2-64-72>

EDN:ARIEBU

Analysis of the Wi-Fi Network Design Problems Considering Transition to Wi-Fi 8

✉ **Svetlana A. Skorobogatova**, skorobogatova.sa@sut.ru

✉ **Anton S. Vikulov**, vikulov.as@sut.ru

✉ **Aleksandr I. Paramonov**, paramonov@sut.ru

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

The relevance of this work is driven by the widespread adoption of IEEE 802.11 networks. This article examines the key innovations associated with the transition from the seventh-generation IEEE 802.11be Wi-Fi standard, known as Wi-Fi 7, to the eighth-generation IEEE 802.11bn standard, known as Wi-Fi 8. Specifically, attention is paid to the throughput improvements, the implementation of more advanced modulation methods, and support for multi-channel transmissions, which significantly improves the speed and stability of connections. The eighth-generation standard is expected to introduce fundamentally new approaches to organizing client-access point interactions. Unlike 802.11be, 802.11bn is expected to enable simultaneous operation of a single client with multiple access points and vice versa. This will fundamentally change most of existing radio environment management mechanisms, but at the same time, it will provide previously unreachable mobility within a distributed wireless infrastructure. Current challenges facing the industry are also considered, including compatibility with previous generations of standards and the complexities that arise during wireless local area networks design.

Purpose: A systematic review of the key features of the latest addition to the IEEE 802.11be standard, known as Wi-Fi 7, and the next generation of IEEE 802.11bn, known as Wi-Fi 8, currently under development.

Methods: Analysis of professional and scientific literature, standards texts, and industry practices.

Results. In addressing the stated objective, this paper presents an overview of the key improvements expected in the IEEE 802.11bn standard. Particular attention is paid to changing approaches to WLAN design in the context of new technologies such as Distributed Multi-Link Operation and Multi-AP Coordination.

Theoretical significance lies in the analysis of the key aspects of the innovations in IEEE 802.11be and IEEE 802.11bn. Research problems requiring solutions that require the revision and sophistication of existing models and methods are identified. These include: dynamic resource allocation in multi-band networks, optimization of spectrum resource use, development of radio resource management algorithms, and development of handover algorithms.

Practical significance: The obtained results can be used when formulating design problems for seventh- and eighth-generation Wi-Fi networks.

Keywords: Wi-Fi 7, Wi-Fi 8, Wi-Fi Networks Design

For citation: Skorobogatova S.A., Vikulov A.S., Paramonov A.I. Analysis of Wi-Fi Network Design Problems Considering Transition to Wi-Fi 8 transition. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(2):64–72. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-2-64-72. EDN:ARIEBU

Введение

Современные приложения, высокоскоростные вычисления, облачное хранилище, видеозвонки и потоковая передача в формате 4K, а также услуги телеприсутствия и интерактивное взаимодействие с метавселенной [1] требуют беспроводного доступа, обеспечивающего не только высокую пропускную способность, но и стабильное соединение, низкую задержку и возможность работы с большим

числом подключенных устройств одновременно. В инженерной литературе можно встретить понятие «емкости» беспроводной сети. Под ним в широком смысле понимается число пользовательских устройств, работу которых сетевая инфраструктура может обеспечить при заданных критериях качества обслуживания. Для удовлетворения этих растущих требований происходит непрерывное развитие стандарта IEEE.

Ранее авторами был проведен анализ эволюционного развития стандарта IEEE 802.11 [2] до появления 802.11be (Wi-Fi 7).

В данной статье рассматриваются ключевые нововведения, внедренные в 802.11be, а также нерешенные проблемы, которые требуют внимания в контексте будущих поколений стандарта. Основной акцент сделан на анализе дополнения стандарта 802.11bn, которое сейчас находится на ранней стадии разработки. Необходимо отметить, что IEEE 802.11be в целом ориентирован на увеличение скорости и производительности сети, тогда как IEEE 802.11bn (режим обозначается как UHR, *аббр. от англ. Ultra High Reliability*) нацелен на повышение надежности и сокращение задержек, при этом сохраняя все улучшения, предоставленные IEEE 802.11be. Поэтому в данной работе уделим внимание текущему состоянию IEEE 802.11be, ожидаемым нововведениям в IEEE 802.11bn, а также тому, как они могут повлиять на будущее технологии беспроводных локальных сетей и подходы к их проектированию. Последнее представляется особенно важным, т. к. есть основания полагать, что нововведения IEEE 802.11bn будут несомненно революционными.

Статья посвящена ожиданиям отрасли от последующих версий стандарта Wi-Fi, а также основным научным, инженерным и технологическим задачам, с которыми предстоит столкнуться сетям данного стандарта в течение ближайших 4–5 лет.

1. Анализ основных нововведений IEEE 802.11be (EHT)

Работа над дополнением IEEE 802.11be началась в мае 2019 г. незадолго до принятия дополнения IEEE 802.11ax. Как следует из названия режима EHT, основной целью было еще большее увеличение пропускной способности и производительности. Изначально запланированные даты принятия дополнения неоднократно переносились, а окончательно стандарт был утвержден в июле 2025 г. Тем не менее, как это уже имело место с ранее выходившими дополнениями, например IEEE 802.11ac и IEEE 802.11ax, многие поставщики предлагают продукты и решения с поддержкой еще не вышедшего стандарта. Чаще всего такие реализации основаны на draft-версиях стандарта и в последующем дорабатываются программно. Далее будут представлены ключевые изменения, предложенные в стандарте IEEE 802.11be.

1.1. Увеличение ширины канала до 320 МГц в диапазоне 6 ГГц

Расширение возможной ширины канала до 320 МГц (т. е. канал типа EHT320) представляет собой дальнейшее развитие предыдущих версий стандартов IEEE 802.11ac/ax, где максимальная ширина канала составляла 160 МГц (тип канала HE160) в диапазоне 5 ГГц (UNII-1,2,3). Эта функция доступна в поддиапазонах UNII-5,6,7,8 и значительно повышает теоретически достижимую скорость передачи данных. В то же время число таких каналов в частотном плане не может превышать трех, что говорит о крайней ограниченности возможностей таких режимов для построения распределенных сетей данного стандарта. То же самое можно было ранее сказать и о каналах EHT160 в поддиапазонах UNII-1,2,3.

1.2. Режим 4096-QAM

Дополнение IEEE 802.11be вводит использование модуляции 4096-QAM, которая увеличивает скорость передачи данных на 20 % по сравнению с максимальной для IEEE 802.11ax модуляцией 1024-QAM, передавая 12 бит на символ в расчете на каждую поднесущую. Таким образом, обновленная таблица режимов модуляции и кодирования (MCS) для канала шириной 20 МГц при одном пространственно-временном потоке и защитном интервале 800 нс содержит максимальную канальную скорость передачи – 172,1 Мбит/с. Отметим, что наиболее скоростные режимы, с одной стороны, часто являются опциональными, а с другой – самыми энергозатратными, по причине больших требуемых для их работы вычислительных ресурсов. Поэтому на практике даже при выполнении всех условий, необходимых для задействования наиболее скоростных MCS, они используются не постоянно. Тем не менее, ретроспективно оглядываясь на процесс развития стандарта, хорошо видно, что используемые на практике скорости передачи на принятых в стандарте MCS устойчиво растут.

1.3. Multi-Link Operation (MLO)

В технологии MLO технологии MLO определено несколько режимов работ, каждый из которых имеет свои особенности¹.

Multi-Link Single Radio (MLSR)

В режиме MLSR используется только один радиомодуль. Устройство может прослушивать несколько каналов, но в каждый момент времени активен только один из них, то есть одновременная передача и прием не поддерживаются.

¹ Trivedi S., Doshi N. Wi-Fi 7's Multi-Link Operation (MLO) // CISCO. 2025. URL: <https://blogs.cisco.com/networking/wi-fi-7s-multi-link-operation-mlo-dissection-from-packets-to-performance> (Accessed 13 May 2025)

Enhanced Multi-Link Single Radio (EMLSR)

Улучшенная версия MLSR, которая позволяет динамически переключаться между каналами, снижая энергопотребление и задержки. EMLSR позволяет устройствам одновременно прослушивать несколько каналов, но передача или прием данных возможны только по одному каналу. Также EMLSR позволяет динамически переключаться между диапазонами для улучшения энергоэффективности и оптимизации использования ресурсов. EMLSR может использовать сканирующие радиомодули в дополнение к основным, чтобы поддерживать работу на разных каналах (например, на 6 ГГц и 5 ГГц) [3].

Simultaneous Transmit/Receive (STR)

В режиме STR устройства могут одновременно передавать и принимать данные на нескольких каналах. Это значительно повышает пропускную способность и снижает задержки, так как устройство может работать с несколькими каналами одновременно.

Non-Simultaneous Transmit/Receive (NSTR)

В данном режиме передача и прием данных происходят с синхронизацией, что предотвращает коллизии и помехи между каналами. Синхронизация передачи и приема данных помогает избежать проблем с помехами и снижает риски для стабильности связи. Такой режим полезен в условиях высоконагруженных сетей, где важно поддержание устойчивого соединения.

Enhanced Multi-Link Multi-Radio (EMLMR)

EMLMR требует наличия более двух радиомодулей и представляет собой усовершенствованную версию режима STR, позволяя динамически адаптироваться к доступным частотам. Это особенно полезно в условиях изменяющейся загрузки сети и изменяющейся картины помех в спектре.

Как показано в [4], режим STR демонстрирует более высокую пропускную способность и меньшие задержки по сравнению с EMLSR, что делает его предпочтительным для высоконагруженных сетей. В то же время EMLSR обеспечивает баланс между производительностью и энергопотреблением, что важно для мобильных устройств. При этом выбор между асинхронной и синхронной передачей в MLO представляет собой компромисс: асинхронный режим обеспечивает лучшую утилизацию многоканального потенциала, тогда как синхронный – большую стабильность соединения за счет координации доступа к каналу.

1.4. Multi-Resource Units (MRU)

В дополнении стандарта IEEE 802.11ax была представлена технология OFDMA, которая позволила делить спектральный ресурс канала на группы поднесущих и назначать их в виде ресурс-

ных блоков для одновременной передачи данных нескольким устройствам. В IEEE 802.11be эта концепция была улучшена с помощью механизма Multi-Resource Units (MRU). MRU позволяют назначать несколько ресурсных блоков одному устройству, повышая гибкость управления спектром и увеличивая спектральную эффективность. При этом ресурсные блоки могут быть разного размера и несмежными в спектре канала. Это особенно ценно в условиях высокой плотности устройств, так как в широком смысле улучшается эффективность использования спектра и конечные характеристики качества соединения.

1.5. Restricted Target Wake Time (R-TWT)

Энергосберегающая технология TWT (*аббр. от англ. Target Wake Time*), впервые представленная в 802.11ax, была дополнительно улучшена в 802.11be. TWT позволяет устройствам согласовывать периоды активности и энергосбережения (сна), сокращая потребление энергии – что особенно важно для устройств, относящихся к Интернету вещей, и мобильных устройств. R-TWT представляет собой дальнейшее усовершенствование подхода TWT, обеспечивая более точный контроль задержек и резервирование сетевых ресурсов на конкретные временные периоды. Это нацелено как на улучшение управления энергопотреблением мобильного устройства, так и на рост производительности.

2. Нерешенные проблемы в IEEE 802.11be

Несмотря на значительные улучшения, представленные дополнением IEEE 802.11be (режимы работы ЕНТ), остаются пока не полностью решенными задачи, которые требуют дальнейшего технологического развития. Некоторые из них изначально планировались для внедрения в ЕНТ, но их реализация была отложена до будущих дополнений стандарта. Так, например, в ранних публикациях на тему ЕНТ можно встретить упоминания о планах на реализацию распределенного MLO [5], а также о потенциале full-duplex [6].

Рассмотрим основные нерешенные вопросы.

1) Переключение клиентских устройств (КУ) между точками доступа (хендовер), работающими под управлением одного контроллера. Быстрое переключение КУ между точками доступа особенно важно, когда устройства работают в разных частотных каналах. Эффективная координация необходима для предотвращения прерывания обслуживания на прикладном уровне во время процесса хендовера. Различные механизмы кеширования РМК-ключа, дополнение IEEE 802.11g и ряд других нововведений облегчают хендовер, но проблема остается неполностью решенной как ввиду необходимости поддержки со стороны КУ, так и по причине

существенной зависимости от алгоритмов, реализованных их производителем.

2) Сложность управления канальным ресурсом. Добавление новых функций и протоколов существенно усложняет контроль доступа к среде передачи (MAC, *аббр. от англ. Media Access Control*), в основе которого лежит метод CSMA/CA, изначально реализованный в самой первой версии стандарта (функция DCF).

Современные КУ, поддерживающие режимы до ЕНТ включительно, могут работать в среде передачи с использованием самых разных комбинаций режимов, к числу которых могут относиться задействование следующих возможных режимов:

- DCA/EDCA/HCCA и их модификации;
- RTS/CTS; greenfield mode;
- MIMO;
- TxBF;
- MU-MIMO;
- OFDMA;
- 802.11w;
- BSS Coloring;
- MRU;
- первичных / вторичных каналов и многих других аспектов.

В случае смеси разнородных КУ в канале точки доступа (ТД), возникающее таким образом «наслоение» протокольных взаимодействий значительно усложняет управление временными и спектральными ресурсами канала. Для многих приложений высокоприоритетные кадры должны передаваться максимально быстро, что может противоречить общей логике алгоритма доступа к каналу.

3) Частичным следствием сложности механизмов доступа к среде является потенциально высокая задержка. Несмотря на то, что стандарт предлагает более высокие скорости передачи данных, задержка при этом остается значимой проблемой. Даже небольшие значения задержки могут негативно сказываться на приложениях, требующих работы в реальном времени, таких как видеоконференции, киберспорт, интернет-навыков [7] или AR / VR (дополненная и виртуальная реальность).

4) Обеспечение совместимости с предыдущими версиями. Совместимость устройств между различными стандартами остается важной проблемой. Поддержка устаревших устройств наряду с новыми технологиями усложняет интеграцию КУ в сеть и может стать барьером для развития инфраструктур.

Все вышеперечисленное подчеркивает необходимость дальнейших улучшений в таких областях, как процесс хендвера, снижение задержек, эффективное управление трафиком и обеспечение совместимости с предыдущими версиями, что, в свою очередь, окажет влияние на развитие беспроводных технологий в рамках стандарта в ближайшем будущем.

3. Краткий обзор IEEE 802.11bn

Стандарт IEEE 802.11bn (UHR) разрабатывается с целью повышения надежности и стабильности беспроводных соединений, что особенно важно для современных приложений. В данном контексте под надежностью понимается устойчивость к потерям пакетов, минимизация задержек, обеспечение резервирования каналов и избыточности. Ожидается, что стандарт обеспечит более высокий уровень надежности передачи данных, снизит задержки и повысит устойчивость к помехам – все это критически важно для приложений, где требуется работа в реальном времени без перебоев.

Рассмотрим ключевые изменения и технологии, запланированные для внедрения в IEEE 802.11bn.

3.1. Hybrid ARQ (HARQ)

Стандарт IEEE 802.11bn внедряет механизм гибридного ARQ (HARQ, *аббр. от англ. Hybrid Automatic Repeat Request*), относящегося к каналам с гибридной решающей обратной связью. Основное отличие HARQ от классического ARQ заключается в том, что при HARQ неправильно принятые блоки данных не отбрасываются, а сохраняются для последующей коррекции (рисунок 1).

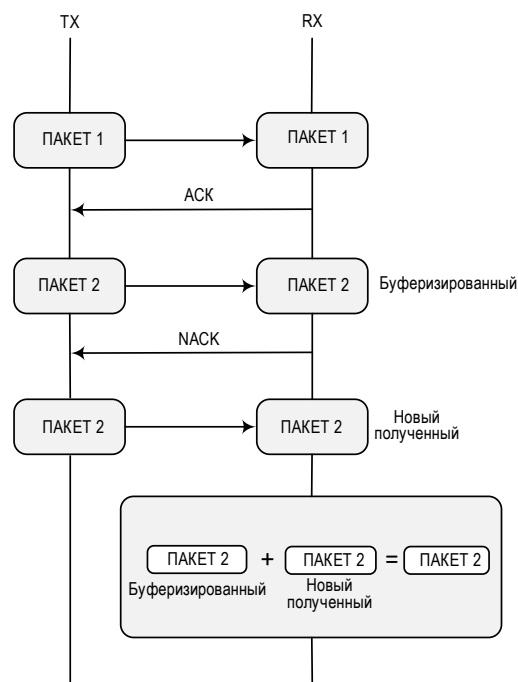


Рис. 1. Концепция HARQ

Fig. 1. HARQ Concept

Когда на принимающее устройство поступает повторно отправленный блок данных, он комбинируется с ранее полученными блоками, что позволяет восстановить данные с большей вероятностью [8]. Внедрение HARQ должно снизить PER (уровень ошибок пакетов), минимизировать риски снижения индекса используемой схемы модуляции

и кодирования (MCS) из-за повторных передач и, таким образом, обеспечить более высокую пропускную способность.

Отметим, что такой подход существенно повышает требования к аппаратным возможностям как КУ, так и точек доступа, одновременно влияя на их энергопотребление, что может иметь влияние на многие аспекты, возникающие как при проектировании беспроводных локальных вычислительных сетей (БЛВС), так и на длительность автономной работы.

3.2. Распределенный MLO (Distributed Multi-Link Operation)

Расширение архитектуры MLO с точки зрения КУ в распределенную структуру позволит устройствам MLD (*аббр. от англ. Multi-Link Device*) работать одновременно с несколькими физическими ТД. Это создает распределенные виртуальные ячейки, в которых мобильность устройств отрабатывается более эффективно. Устройство может одновременно подключаться к нескольким точкам доступа, расположенным в разных зонах, обеспечивая постоянную связь хотя бы по одному каналу [9]. Этот метод интегрирует поддержку быстрого хендовера КУ напрямую в стандарт IEEE 802.11bn, что значительно повышает надежность соединений и улучшает общее качество восприятия. В некотором смысле это можно обозначить, как «взгляд со стороны клиента» на совместную работу ТД.

Необходимо отметить, что для работы технологий MLO, координированного пространственного перераспределения и координированного формирования луча требуется тактовая синхронизация. Это важно, поскольку раньше такая функция была доступна только в сотовых сетях.

Процесс переключения КУ между точками доступа в стандарте IEEE 802.11bn потребует значительных изменений в подходах к управлению беспроводной средой. В конфигурации MLO КУ не всегда может одновременно переключаться между точками доступа на всех доступных частотных диапазонах. Для успешного переключения необходима эффективная координация между точками доступа; без этого могут возникать задержки или потеря пакетов, что негативно сказывается на качестве соединения.

Интересно отметить, что идея координации точек доступа в контексте распределения ресурсов уже реализовывалась на рынке. В первую очередь стоит упомянуть различные сетевые архитектуры mesh, которые отчасти применяли этот подход. Другим примером развития технологии является

концепция Meru Virtual Cell, обеспечивающая координированную работу точек доступа. В Meru Virtual Cell² точки доступа работают как единое целое, что позволяет обеспечить непрерывное переключение между точками доступа без ухудшения качества соединения, поскольку вся БЛВС «видна» КУ как одна ТД. Этот подход продолжает развивать компания Fortinet³.

3.3. Multi Access Point Coordination (MAPC)

Технология MAPC, с точки зрения точки доступа, объединяет MLO и координацию нескольких точек доступа, что позволяет более эффективно управлять сетевыми ресурсами и повышать общее качество обслуживания (рисунок 2). Это можно аналогично представить как «взгляд со стороны ТД».

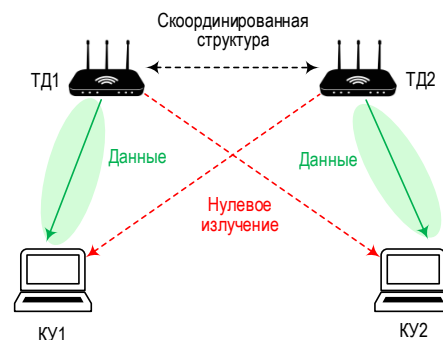


Рис. 2. Схема работы MAPC

Fig. 2. MAPC Operation

Возможные схемы MAPC включают:

- координированный OFDMA;
- координированное пространственное перераспределение;
- координированное формирование луча;
- совместную передачу.

3.4. Другие аспекты

Среди других планируемых улучшений необходимо отметить следующие.

Увеличение максимального числа пространственно-временных потоков до 16 значительно увеличивает потенциальный объем передаваемых данных благодаря использованию технологии многопоточной передачи, что крайне важно для современных приложений. Это нововведение потенциально обеспечивает значительно более высокую пропускную способность.

Стандарт IEEE 802.11bn предполагает значительный шаг вперед в части приоритизации трафика по сравнению с традиционным WMM (*аббр. от англ. Wi-Fi Multimedia*), предлагая больше классов обслуживания, чем существующие четыре

² Best Practices Guide for High-Density Design and Deployment. Meru Networks, 2012. 103 p.

³ Dash K., Gnanasambandam H., Banerjee V. The Power of Virtual Cell Wi-Fi // Fortinet. 2017. URL: <https://www.fortinet.com/blog/industry-trends/the-power-of-virtual-cell-wi-fi> (Accessed 14 April 2025)

(video, voice, best effort, background), что будет способствовать минимизации задержки при передаче.

Эволюция механизмов управления доступом к каналному ресурсу в настоящее время ведет к тому, что с текущим уровнем сложности среды ожидается использование методов искусственного интеллекта и машинного обучения, что позволит улучшить обеспечение мобильности клиентских устройств и управление соединениями. При этом возможен анализ больших объемов данных по использованию спектра, уровню сигнала, картине помех, трафику, что позволит обеспечить RRM для проактивного реагирования на изменения в среде передачи.

Первоначальные реализации стандарта использовали такие модели, как функция распределенной координации (DCF) и функция точечной координации (PCF). С введением стандарта IEEE 802.11e и WMM, были внедрены новые методы, такие как гибридная функция координации с управляемым доступом (HCCA) и расширенный распределенный доступ к каналам (EDCA). Эти методы обеспечивают улучшенную поддержку качества обслуживания в Wi-Fi сетях. WMM, являющийся частью 802.11e, позволяет управлять приоритетами трафика в зависимости от его типа. Например, трафик голосовых и видеозвонков может получать более высокий приоритет, чем фоновый трафик, что обеспечивается через EDCA, который классифицирует трафик по категориям доступа и использует разные параметры конкуренции для доступа к беспроводному каналу⁴. Качество обслуживания в Wi-Fi имеет вероятностную природу, поскольку доступ к беспроводному каналу и успешная передача данных зависят от множества факторов, таких как интенсивность трафика, перегрузка канала и его конкурентное использование.

4. Возникающие научные задачи в связи с внедрением новых технологий

Новый стандарт сталкивается с рядом задач, требующих значительных изменений в проектировании БЛВС. Одним из наиболее критичных аспектов являются изменения в MAC-уровне. Модификации на MAC-уровне значительно усложняют алгоритмы оценки пропускной способности, фундаментально изменяя расчеты сетевой емкости. Ранее расчеты пропускной способности были относительно простыми, поскольку основывались на операциях с одним каналом. В условиях DMLO и возможности одновременного использования нескольких частотных диапазонов сети потребуется динамическое

распределение ресурсов между различными каналами и диапазонами. Это потребует гораздо более сложных алгоритмов, способных управлять распределением трафика в реальном времени и адаптироваться к нагрузке сети. Старые методы статической оценки пропускной способности больше не будут давать реалистичную оценку.

Критерии оценки радиопокрытия с позиций MAPC существенно изменятся, поскольку традиционный подход с требованиями к уровню мощности принимаемого сигнала от первичной (primary) и вторичной (secondary) ТД более не будет однозначно отвечать решению задачи⁵:

1) в рамках MAPC, для скоординированного обслуживания нескольких соединений КУ, должны одновременно работать несколько ТД;

2) одновременное использование нескольких частотных диапазонов потребует усложненных механизмов взаимодействия в спектре, что, в свою очередь, может стать основой для научной задачи оценки пропускной способности сетей с несколькими частотными диапазонами.

Таким образом, от проектировщика БЛВС требуется пересмотреть подходы к расчетам с позиции организации многодиапазонного покрытия.

Для решения задачи частотного планирования потребуются принимать во внимание существенно более широкий спектральный ресурс. Кроме того, внедрение MAPC и DMLO повлияет на развитие алгоритмов управления радиоресурсами (RRM). Эти технологии принесут новый уровень сложности управления, поскольку от RRM будет теперь требоваться не только управление основным каналом для клиента, но также и, как минимум, вторичным, необходимым для резервирования или параллельной работы. Одной из научных задач станет оптимизация сети с использованием MAPC, что может включать разработку алгоритмов для эффективного распределения ресурсов между основными и вторичными каналами, минимизации потерь и улучшения координации между диапазонами.

Важность корректной оценки возможностей КУ (так называемого «профилирования») теперь резко возрастает уже на ранних этапах работы над проектом. В прошлом диапазон возможностей КУ был сравнительно небольшим и в целом предсказуемым, что делало процесс проектирования БЛВС в этом смысле более простым. Однако сейчас обеспечение совместимости проектируемой БЛВС с широким спектром КУ является само по себе отдельной задачей, не всегда очевидной с точки зрения ее постановки. В связи с этим возникает научная задача

⁴ Palayur S., Val Beitia I., Schelstraete S. Quality of Service (QoS) Mechanisms in Wi-Fi // MaxLinear. 24 May 2024. URL: [https://www.maxlinear.com/news/quality-of-service-\(qos\)-mechanisms-in-wi-fi](https://www.maxlinear.com/news/quality-of-service-(qos)-mechanisms-in-wi-fi) (Accessed 1 May 2025)

⁵ Викулов А.С. Скоробогатова С.А. Краткое руководство по планированию Wi-Fi-покрытия. 2024. URL: https://files.qtech.ru/upload/wireless/wi-fi-cover_install_guide.pdf (дата обращения 27 апреля 2026)

разработки подходов к частотному планированию и профилированию устройств, которые учитывают разнообразие характеристик КУ, включая устройства, поддерживающие три радиоканала и работающие с MLO.

Обеспечение обратной совместимости с клиентами предыдущих версий стандарта становится существенно более сложной задачей. Новые режимы должны сосуществовать с более старыми устройствами, обеспечивая соответствующую поддержку предыдущих версий. Планирование работы БЛВС в условиях необходимости обеспечения такой совместимости теперь должно стать неотъемлемой частью процесса проектирования на всех этапах работы над решением проектной задачи.

5. Выводы

Подводя итоги вышесказанному, необходимо отметить, что:

1) дополнения стандартов IEEE 802.11be и 802.11bn – это важные шаги в развитии технологии БЛВС, которые отвечают и будут отвечать растущим требованиям современных приложений;

2) несмотря на заметные достижения, к настоящему времени дополнение IEEE 802.11be имеет

нерешенные проблемы, такие как: сложность управления, высокие задержки и сложности обеспечения совместимости между устройствами разных поколений;

3) основные ожидаемые функции дополнения IEEE 802.11bn, такие как Hybrid ARQ, 16 пространственно-временных потоков, DMLO и MAPS будут востребованы в свете роста требований к производительности и задержке для многих приложений клиентских устройств;

4) внедрение новых стандартов IEEE 802.11be и 802.11bn также ставит перед сообществом необходимость в новых подходах к решению таких задач, как динамическое распределение ресурсов в многодиапазонных сетях, оптимизация использования спектрального ресурса, развитие алгоритмов управления радиоресурсами и обеспечения хендовера, что потребует переработку и усложнение существующих моделей и методов.

Решение этих задач потребует создания новых подходов к частотному планированию и профилированию КУ с учетом их разнообразия и способности поддерживать современные технологии, такие как MLO.

Список источников

1. Volkov A., Muthanna A., Paramonov A., Koucheryavy A., Elgendy I.A. Optimized Data Transmission and Signal Processing for Telepresence Suits in Multiverse Interactions // *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2024. Vol. 13. Iss. 6. P. 82. DOI:10.3390/jsan13060082. EDN:VBEMLB
2. Скоробогатова С.А., Викулов А.С., Парамонов А.И. Анализ эволюционного развития сетей Wi-Fi за первую четверть 21 века // *Труды учебных заведений связи*. 2025. Т. 11. № 6. С. 68–77. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-68-77. EDN:YUSEEH
3. Lan X., Zu X., Yang J. Enhanced Multilink Single-Radio Operation for the Next-Generation IEEE 802.11 BE Wi-Fi Systems // *Security and Communication Networks*. 2022. DOI:10.1155/2022/7018360. EDN:JVAZVS
4. Choerakuzhiyil A., Ho K., Reyes S. Comparison of STR and EMLSR Performance in Wi-Fi 7 MLO // *arXiv:2501.04149*. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2501.04149
5. Lopez-Perez D., Garcia-Rodriguez A., Galati Giordano L., Kasslin M., Doppler K. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax // *arXiv:1902.04320*. 2019. DOI:10.48550/arXiv.1902.04320
6. Deng C., Fang X., Han X., Wang X., Yan L., He R., et al. IEEE 802.11be-Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities // *arXiv:2007.13401*. 2020. DOI:10.48550/arXiv.2007.13401
7. Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А., Киричек Р.В., Бородин А.С., Маколкина М.А., Выборнова А.И. и др. Интернет навыков // *Электросвязь*. 2018. № 1. С. 29–32. EDN:YSUVWI
8. Shishir G., Sonigra R., Seshadri N., Koilpillai R.D. Hybrid-ARQ Protocol for Next Generation Wi-Fi Systems // *Proceedings of the International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS, Bangalore, India, 05–09 January 2021)*. IEEE, 2021. PP. 342–350. DOI:10.1109/COMSNETS51098.2021.9352833
9. Galati Giordano L., Geraci G., Carrascosa M., Bellalta B. What Will Wi-Fi 8 Be? A Primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability // *IEEE Communications Magazine*. 2023. Vol. 62. Iss. 8. PP. 126–132. DOI:10.1109/MCOM.001.2300728

References

1. Volkov A., Muthanna A., Paramonov A., Koucheryavy A., Elgendy I.A. Optimized Data Transmission and Signal Processing for Telepresence Suits in Multiverse Interactions. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2024;13(6):82. DOI:10.3390/jsan13060082. EDN:VBEMLB
2. Skorobogatova S.A., Vikulov A.S., Paramonov A.I. Analysis of Wi-Fi Networks Evolution During the First Quarter of the 21st Century. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(6):68–77. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-68-77. EDN:YUSEEH
3. Lan X., Zu X., Yang J. Enhanced Multilink Single-Radio Operation for the Next-Generation IEEE 802.11be Wi-Fi Systems. *Security and Communication Networks*. 2022. DOI:10.1155/2022/7018360. EDN:JVAZVS

4. Choorakuzhiyil A., Ho K., Reyes S. Comparison of STR and EMLSR Performance in Wi-Fi 7 MLO. *arXiv:2501.04149*. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2501.04149
5. Lopez-Perez D., Garcia-Rodriguez A., Galati Giordano L., Kasslin M., Doppler K. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax. *arXiv:1902.04320*. 2019. DOI:10.48550/arXiv.1902.04320
6. Deng C., Fang X., Han X., Wang X., Yan L., He R., et al. IEEE 802.11be – Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities. *arXiv:2007.13401*. 2020. DOI:10.48550/arXiv.2007.13401
7. Koucheryavy A.Eu., Koucheryavy Y.A., Kirichek R.V., Borodin A.S., Makolkina M.A., Vybornova A.I., et al. *Electrosvyaz*. 2018;1:29–32. (in Russ.) EDN:YSUVWI
8. Shishir G., Sonigra R., Seshadri N., Koilpillai R.D. Hybrid-ARQ Protocol for Next Generation Wi-Fi Systems. *Proceedings of the International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS, COMSNETS, 05–09 January 2021, Bangalore, India*. IEEE; 2021. p.342–350. DOI:10.1109/COMSNETS51098.2021.9352833
9. Galati Giordano L., Geraci G., Carrascosa M., Bellalta B. What Will Wi-Fi 8 Be? A Primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability. *IEEE Communications Magazine*. 2023;62(8):126–132. DOI:10.1109/MCOM.001.2300728

Статья поступила в редакцию 22.05.2025; одобрена после рецензирования 28.08.2025; принята к публикации 19.03.2026

The article was submitted 22.05.2025; approved after reviewing 28.08.2025; accepted for publication 19.03.2026

Информация об авторах:

СКОРОБОГАТОВА
Светлана Алексеевна

аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0000-1013-617X>

ВИКУЛОВ
Антон Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-6671-9267>

ПАРАМОНОВ
Александр Иванович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-4104-3504>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.