

УДК 621.391 : 004.725.5

**ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ Wi-Fi 8:
НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ОТКРЫТЫЕ ЗАДАЧИ¹**

© 2025 г. **А.Ю. Карамышев^{a,b}, И.А. Левицкий^{a,b}, Д.В. Банков^{a,b},
Е.М. Хоров^{a,b}**

^a *Институт проблем передачи информации
им. А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва*
^b *Московский независимый исследовательский институт
искусственного интеллекта (МНИИ ИИ), Москва*

*E-mail: karamyshev@wnlab.ru, levitsky@wnlab.ru, bankov@wnlab.ru,
khorov@wnlab.ru*

Стандарт Wi-Fi 8 IEEE 802.11bn, разработка которого ведется в настоящее время, представляет собой очередной этап эволюции беспроводных технологий. В отличие от предыдущих поколений, ориентированных в первую очередь на увеличение пиковой пропускной способности, основная цель Wi-Fi 8 – обеспечение сверхнадежной связи и предсказуемой производительности беспроводной сети. Это обусловлено требованиями новых сценариев использования, таких как промышленный интернет, поддержка приложений дополненной и виртуальной реальности, искусственного интеллекта, а также развертывание плотных публичных сетей. Ключевые целевые показатели включают повышение пропускной способности в условиях низкого отношения сигнал/шум, снижение 95-го перцентиля задержки, уменьшение потерь пакетов и оптимизацию энергопотребления. Для их достижения в стандарт вводятся новые методы, в числе которых распределенные по поднесущим ресурсные блоки, использование различных сигнально-кодowych конструкций в разных пространственных потоках, усовершенствованные методы доступа к каналу, беспроводный роуминг и координированное управление множеством точек доступа. В статье представлен текущий статус разработки стандарта Wi-Fi 8, проведен анализ его целевых показателей производительности и рассматриваются соответствующие технические решения. Также в статье сформулированы перспективные направления исследований, требующие разработки новых алгоритмов и методов оптимизации использования радиоресурсов для полной реализации потенциала технологии. Статья будет полезна исследователям, занимающимся математическим моделированием и решением оптимизационных задач в области беспроводных сетей. Описанные новые механизмы Wi-Fi 8 создают принципиально новые постановки задач оптимизации и требуют разработки соответствующих алгоритмов для управления радиоресурсами, планирования передач и координации устройств. Материалы статьи помогут сформулировать новые оптимизационные модели и определить целевые функции для создания эффективных алгоритмов, учитывающих специфику нового стандарта.

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00756, <https://rscf.ru/project/23-19-00756/>.

Ключевые слова: Wi-Fi 8, IEEE 802.11bn, беспроводные сети, сверхнадежная связь, промышленный интернет, задержка, координация точек доступа, искусственный интеллект

DOI: 10.7868/S3034583925030016

Поступила в редакцию 29.07.2025

После доработки 05.09.2025

Принята к публикации 15.09.2025

§ 1. Введение

Современную жизнь трудно представить без технологии Wi-Fi, которая продолжает активно развиваться. Несмотря на широкое распространение, существующие реализации Wi-Fi демонстрируют недостаточную надежность в ряде сценариев. Например, наблюдаются перебои в обслуживании в условиях плотного развертывания сетей, а перемещение клиента между точками доступа (англ.: Access Point, AP) сопровождается значительными задержками повторного подключения. В связи с этим повышение надежности и стабильности работы остается одной из ключевых задач дальнейшего развития технологии.

Основной целью разрабатываемого стандарта восьмого поколения Wi-Fi (IEEE 802.11bn) является гарантированное обеспечение требований к качеству обслуживания (англ.: Quality of Service, QoS) для широкого спектра применений [1]. Новое дополнение к стандарту включает механизмы, направленные на достижение высокой пропускной способности, сверхнизкой задержки, высокой надежности передачи данных и снижения энергопотребления (см. [1, 2] и [3, doc.: 23/0480r3]). Ожидается, что коммерческое внедрение Wi-Fi 8 начнется в 2027–2028 годах, а его активное использование продлится вплоть до 2030-х годов (ИМТ-2030 [4]). Это означает, что Wi-Fi 8 будет конкурировать на рынке с технологиями 5G-Advanced (3GPP Release 20) и 6G [5–7]. Поэтому важно обеспечить его преимущества перед технологиями сотовых сетей.

Ряд работ [1, 2, 8] уже представили краткие обзоры возможностей Wi-Fi 8, однако приведенная в них информация частично устарела в связи с активным развитием дополнения 802.11bn. Существуют также исследования, сфокусированные на отдельных нововведениях стандарта, таких как координация множества точек доступа (англ.: Multi-AP coordination) в условиях плотного развертывания сетей (англ.: Overlapping Basic Service Set, OBSS) [9–15], методы доступа к каналу с низкой задержкой [16, 17], бесшовный роуминг [18, 19] и новые методы энергосбережения [20]. Однако актуальный и всесторонний обзор новых механизмов Wi-Fi 8 и открытых задач по их оптимальному использованию в литературе на данный момент отсутствует.

Настоящий обзор содержит подробный анализ нововведений, которые обсуждаются в качестве потенциальных усовершенствований, уже вошли или войдут в дополнение IEEE 802.11bn для Wi-Fi 8. В статье рассматриваются ключевые показатели эффективности технологии в контексте требований ИМТ-2030. Отдельное внимание уделяется перспективным направлениям для дальнейших исследований. Мы ожидаем, что статья будет полезна не только тем, кто изучает новые технологии связи, но и тем, кто разрабатывает математический аппарат и алгоритмы для оптимизации их работы. Статья является уточнением (и русской версией) нашей работы [21].

Статья имеет следующую структуру. В § 2 представлена краткая эволюция стандартов Wi-Fi и обсуждаются текущие нерешенные проблемы. В § 3 описаны целевые сценарии использования следующего поколения, их ключевые требования, а также формальные цели и сроки разработки стандарта 802.11bn. В § 4 содержится краткий

обзор потенциальных новых механизмов Wi-Fi 8. В § 5–7, посвященных физическому уровню (англ.: Physical Layer, PHY), подуровню управления доступом к среде (англ.: Medium Access Control Layer, MAC) и методам координации множества точек доступа, соответственно, подробно рассмотрены ключевые механизмы-кандидаты и связанные с ними открытые задачи. В § 8 представлены заключительные выводы.

§ 2. Эволюция стандартов IEEE 802.11

С момента появления первой версии в 1997 году технология Wi-Fi, описываемая семейством стандартов IEEE 802.11, прошла значительный путь развития: от простого решения с максимальной скоростью 2 Мбит/с в диапазоне 2,4 ГГц до неотъемлемого компонента современных мультигигабитных беспроводных сетей, поддерживающего широкий спектр приложений и сервисов. В данном параграфе рассматриваются ключевые этапы этой эволюции и соответствующие технологические усовершенствования.

2.1. IEEE 802.11a и IEEE 802.11g. Существенный скачок в развитии произошел с принятием стандарта 802.11a, который заложил основу протокола физического уровня для большинства последующих версий Wi-Fi. Этот стандарт предусматривал работу в диапазоне 5 ГГц со скоростью до 54 Мбит/с. Наиболее значимым нововведением стало ортогональное частотное мультиплексирование (англ.: Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), которое, в отличие от предшествующих схем с одной несущей, эффективно противодействует затуханию сигнала на высоких частотах, узкополосным помехам и частотно-селективным замираниям, вызванным многолучевым распространением. Кадры 802.11a состоят из OFDM-символов длительностью 4 мкс (включая защитный интервал 0,8 мкс). В них используются 52 из 64 поднесущих: 48 поднесущих для передачи данных и 4 пилотных поднесущих для фазовой коррекции, а остальные 12 служат в качестве краевых и защитных поднесущих.

Стандарт 802.11g адаптировал технологию OFDM для диапазона 2,4 ГГц. Примечательно, что это первый стандарт, столкнувшийся с проблемами совместимости с устаревшими устройствами, использовавшими методы модуляции из прошлых поколений стандарта.

2.2. IEEE 802.11e. Дополнение 802.11e существенно улучшило базовый стандарт, внедрив поддержку качества обслуживания QoS [22, 23]. На основе традиционного метода распределенного доступа к каналу (англ.: Distributed Coordination Function, DCF) в 802.11e был кардинально переработан подуровень управления доступом к среде (англ.: Medium Access Control, MAC) для поддержки дифференцированного сервиса. В частности, появился механизм улучшенного распределенного доступа к каналу (англ.: Enhanced Distributed Channel Access, EDCA), который используется повсеместно в современных сетях Wi-Fi.

EDCA реализует приоритезацию трафика путем классификации кадров по четырем категориям доступа (англ.: Access Category, AC): голосовой трафик, видеотрафик, трафик с негарантированной доставкой и фоновый трафик. В отличие от единых параметров доступа в DCF каждая категория AC в EDCA имеет индивидуальные настройки, включая минимальный и максимальный размеры конкурентного окна и арбитражный межкадровый интервал (англ.: Arbitration Interframe Space, AIFS), заменяющий единый интервал DIFS, который разделяет цепочки передач в DCF. Кроме того, с помощью нового метода TXOP (англ.: Transmission Opportunity – возможность передачи) получив доступ к каналу, станция (англ.: station, STA) может передать не ровно один кадр данных, а сразу несколько, если суммарная длительность всей цепочки кадров не превышает установленный предел. Таким

образом, EDCA повышает качество обслуживания для чувствительных к задержкам приложений, сохраняя обратную совместимость с DCF.

В 802.11e также появился механизм блочного подтверждения (англ.: Block Acknowledgment, Block Ack), позволяющий подтверждать получение сразу нескольких кадров данных одним кадром подтверждения (англ.: Acknowledgment, Ack), что существенно снижает накладные расходы по сравнению с покадровыми подтверждениями. Это нововведение в сочетании с ТХОР повышает реальную пропускную способность, обеспечивая выборочную повторную передачу только неудачно переданных кадров.

2.3. IEEE 802.11n. Стандарт 802.11n, получивший коммерческое название Wi-Fi 4, обеспечил десятикратное увеличение номинальной скорости передачи данных до 600 Мбит/с в диапазонах 2,4 и 5 ГГц [24]. Это достигнуто благодаря двум ключевым инновациям на физическом уровне: использованию каналов шириной 40 МГц вместо 20 МГц и внедрению технологии многоантенных передач (англ.: Multiple Input Multiple Output, MIMO) с поддержкой до четырех пространственных потоков (англ.: Spatial Stream, SS).

Дополнительные улучшения включают повышенную кодовую скорость, сокращенный защитный интервал 0,4 мкс и увеличенное количество используемых поднесущих (для передачи данных + пилотные): до $52+4$ в канале 20 МГц и до $(54+3) \times 2$ в канале 40 МГц. Наряду с традиционными сверточными кодами, в 802.11n появились более эффективные коды с малой плотностью проверок (МПП) на четность (англ.: Low-Density Parity-Check, LDPC), которые были опциональны в Wi-Fi 4, но стали обязательными, начиная с Wi-Fi 6.

Для снижения накладных расходов в 802.11n введены два метода агрегации кадров на MAC-подуровне: A-MSDU (англ.: Aggregated MAC Service Data Unit) и A-MPDU (англ.: Aggregated MAC Protocol Data Unit). A-MSDU использует единый MAC-заголовок и контрольную сумму для всего блока, тогда как A-MPDU инкапсулирует каждый пакет с индивидуальным заголовком, что увеличивает накладные расходы, но позволяет независимо декодировать каждый пакет внутри агрегированного кадра. При использовании A-MPDU естественно использовать кадры Block Ack из 802.11e для подтверждения успешно принятых пакетов и повторной передачи остальных.

2.4. IEEE 802.11ac. Стандарт 802.11ac (Wi-Fi 5) продолжил тенденцию к увеличению номинальной пропускной способности, которая достигла уже 7 Гбит/с [25]. Основные усовершенствования включают:

- поддержку каналов шириной до 160 МГц с возможностью объединения несмежных каналов 80+80 МГц;
- увеличение максимального количества пространственных потоков до восьми;
- внедрение многопользовательских передач MIMO (англ.: Multi-User MIMO, MU-MIMO) для нисходящего канала (англ.: Downlink, DL);
- применение модуляции 256-QAM, которая повышает скорость на 33% по сравнению с 64-QAM, которая ранее была максимальной;
- увеличение максимальной длины кадра до 4,6 МБ для снижения накладных расходов на заголовки и межкадровые интервалы при использовании высокоскоростных сигнально-кодовых конструкций (СКК, англ.: Modulation and Coding Scheme, MCS).

Для использования широких каналов в каждой сети определяется основной подканал 20 МГц, где станции соревнуются за доступ к среде. Затем, выиграв соревнование в первичном подканале, станция может увеличить полосу, в которой передает, путем последовательного объединения вторичных подканалов шириной

Таблица 1

Максимальное количество ресурсных блоков
для различных ширин канала в Wi-Fi 6

Размер RU	20 МГц	40 МГц	80 МГц	160 МГц
26 поднесущих	9	18	37	74
52 поднесущих	4 ⁺¹	8 ⁺²	16 ⁺⁵	32 ⁺¹⁰
106 поднесущих	2 ⁺¹	4 ⁺²	8 ⁺⁵	16 ⁺¹⁰
242 поднесущих	1	2	4 ⁺¹	8 ⁺²
484 поднесущих	–	1	2 ⁺¹	4 ⁺²
996 поднесущих	–	–	1	2
1998 поднесущих	–	–	–	1

Примечание: ⁺ⁿ обозначает наличие *n* дополнительных ресурсных блоков шириной 26 поднесущих

20 МГц, 40 МГц и 80 МГц, если они свободны. Однако если первичный подканал занят, а остальная часть полосы простаивает, станция не может ее использовать, что ограничивает производительность 802.11ac в плотных сетях. Поскольку ширина диапазона 2,4 ГГц недостаточна даже для канала 80 МГц, 802.11ac работает исключительно в диапазоне 5 ГГц.

2.5. IEEE 802.11ah. Стандарт 802.11ah, известный как Wi-Fi HaLow, ориентирован на сценарии интернета вещей (англ.: Internet of Things, IoT) [26–29]. Стандарт использует диапазон ниже 1 ГГц с каналами шириной от 1 до 16 МГц. Хотя коммерческое распространение Wi-Fi HaLow остается ограниченным, в нем реализованы важные концепции, включая механизм назначенного времени пробуждения (англ.: Target Wake Time, TWT) [29] для энергосбережения, впоследствии усовершенствованный в следующих поколениях стандартов Wi-Fi.

С помощью TWT станция договаривается с точкой доступа о наборе периодов обслуживания (англ.: Service Period, SP), в течение которых они могут общаться, и следовательно, станция может выключить свой радиомодуль вне TWT SP для экономии энергии.

2.6. IEEE 802.11ax. Стандарт 802.11ax (Wi-Fi 6) сместил акцент с увеличения номинальной скорости передачи данных на улучшение реальной пропускной способности и качества обслуживания в условиях высокоплотных сетей с сильной интерференцией [30, 31], [3, doc.: 14/0165r1]. Перечислим основные нововведения.

Главное нововведение – ортогональный множественный доступ с частотным разделением (англ.: Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA), который позволяет гибко распределять частоты. Он дает возможность точке доступа разделить частотный канал на более мелкие части, называемые ресурсными блоками (англ.: Resource Unit, RU), и выделить их одновременно разным станциям так, чтобы каждая станция получила не более одного RU (возможно, различной ширины). В табл. 1 показано максимальное количество RU для каждой ширины канала, доступной в Wi-Fi 6.

Чтобы расширить возможности OFDMA, стандарт 802.11ax изменяет нумерологию OFDM, делая символы в четыре раза длиннее, а количество поднесущих – в четыре раза больше. Положительным побочным эффектом этого обновления является то, что относительные накладные расходы на защитный интервал снижаются примерно до 6% для нового символа длиной 12,8 мкс и защитного интервала 0,8 мкс. Кроме того, 802.11ax вводит модуляцию 1024-QAM, которая на 25% быстрее 256-QAM, используемой в Wi-Fi 5. Наконец, начиная с этого Wi-Fi 6, можно использовать Wi-Fi в диапазоне 6 ГГц.

Для обеспечения работы OFDMA и MU-MIMO в восходящем канале (англ.: Uplink, UL), Wi-Fi 6 вводит триггер-кадры (англ.: Trigger Frame, TF). Они инициируют и синхронизируют последовательность передачи от нескольких станций в восходящем канале, а также передают параметры передачи: сигнально-кодую конструкцию, мощность, длительность и т.д.

Важно отметить, что эффективная работа в плотных сетях (англ.: Basic Service Set, BSS) была в центре внимания разработчиков 802.11ax [3, doc.: 14/0165r1]. В результате 802.11ax перешел от ограничения возможных коллизий передач в соседних сетях к парадигме пространственного повторного использования радиочастотных ресурсов (англ.: Spatial Reuse, SR), разрешая одновременные передачи в нескольких OBSS.

Ключевые особенности SR включают раскраску BSS, определяющую уникальные идентификаторы, которые помогают устройству легко отличить трафик из своей BSS от трафика из OBSS; использование двух счетчиков NAV (англ.: Network Allocation Vector, NAV) для поддержания отдельных таймеров резервирования каналов в своей и чужой сети; и механизм обнаружения пакетов OBSS (англ.: OBSS Packet Detect, OBSS PD), который позволяет устройству передавать сигнал одновременно с передачей в OBSS, если его собственная передача не повреждает текущую.

Чтобы преодолеть ограничение 802.11ac, связанное с объединением каналов по принципу «все или ничего», в 802.11ax введен механизм пропуска подканалов, названный в стандарте механизмом прокалывания преамбул (англ.: Preamble Puncturing). Этот механизм позволяет выборочно исключать занятые подканалы шириной в 20 МГц или больше в широком канале, оставляя возможность вести передачу в свободных подканалах. Это позволяет выборочно исключить некоторые занятые подканалы во время передачи MU OFDMA на остальных.

Совокупность нововведений стандарта 802.11ax имела своей целью кратное улучшение пользовательской пропускной способности, при увеличении пиковой скорости всего до 9,6 Гбит/с, т.е. примерно лишь на треть по сравнению с 802.11ac.

2.7. IEEE 802.11be. Стандарт Wi-Fi 7 (802.11be) ориентирован на приложения реального времени с требованиями высокой пропускной способности и низкой задержки [32, 33]. Перечислим его основные усовершенствования.

- Увеличение ширины канала до 320 МГц в диапазоне 6 ГГц и внедрение модуляции 4096-QAM с 20% приростом скорости. В совокупности это обеспечивает номинальную скорость передачи данных до 2,88 Гбит/с на один пространственный поток или до 23 Гбит/с при использовании восьми пространственных потоков [34].
- Многоканальная работа (англ.: Multi-Link Operation, MLO) – пожалуй, ключевое нововведение стандарта, обеспечивающее гибкость при одновременном использовании еще большей ширины полосы. MLO позволяет устройствам одновременно использовать несколько частотных каналов, распределяя нагрузку между ними с учетом занятости каналов. Во многих работах показано, что это повышает пропускную способность, надежность, а также снижает задержку и джиттер [35–38].
- Комбинированные ресурсные блоки (англ.: Multiple Resource Unit, MRU) – новые ресурсные блоки, представляющие собой объединение нескольких ресурсных блоков. За счет использования MRU, снижается неэффективность распределения ресурсных блоков в Wi-Fi 6, обусловленная невозможностью назначить два ресурсных блока одной станции. Например, ресурсный блок шириной 484 + 242 поднесущих объединяет два ресурсных блока из табл. 1 в один комбинированный ресурсный блок, шириной 60 МГц.
- Совместное использование TXOP по триггеру (англ.: Triggered TXOP Sharing, TXS), которое позволяет точкам доступа выделять часть своего TXOP опреде-

ленной станции либо для передачи данных обратно к точке доступа, либо для прямой передачи данных непосредственно между двумя клиентскими станциями (англ.: Peer-to-Peer, P2P).

- Защищенный назначенный момент пробуждения (англ.: Restricted TWT, R-TWT), который позволяет зарезервировать моменты времени, когда станции могут получить доступ к каналу с низкой конкуренцией, что почти наверняка гарантирует низкую задержку передачи данных [39]. Иными словами, R-TWT позволяет точке доступа и некоторым станциям договориться о расписании R-TWT SP, причем всем другим станциям в этой сети будет запрещено пересекать своей передачей момент начала R-TWT SP.

Ряд перспективных механизмов, например, Multi-AP координация, был отложен до следующих версий стандарта из-за сложности реализации.

2.8. Актуальные проблемы и технические ограничения. Несмотря на значительный прогресс, современные сети Wi-Fi сталкиваются с рядом проблем.

Во-первых, ненадежность соединений в условиях высокой плотности устройств остается серьезной проблемой. Помехи на нелицензируемых радиоканалах, идентифицируемые как основной фактор снижения производительности [40], стремительно усугубляются с ростом числа подключенных устройств.

Во-вторых, производительность сетей Wi-Fi оказывается недостаточной для новых типов приложений, например, приложений расширенной реальности (англ.: eXtended Reality, XR), облачных игр и систем промышленной автоматизации, требующих детерминированной доставки пакетов с крайне низкой задержкой.

В-третьих, методы обеспечения требуемого качества обслуживания не всегда справляются со своими задачами. Например, R-TWT уязвим к помехам из соседних сетей (см. [3, doc.: 23/0226r1] и [41]). Отсутствуют механизмы вытеснения трафика для критически важных приложений [42] и не поддерживается беспроводная мобильность, что является критичным для сценариев с трафиком, чувствительным к задержкам.

Эти проблемы определяют направления развития будущих поколений Wi-Fi, в частности, стандарта 802.11bn (Wi-Fi 8), ориентированного на обеспечение сверхвысокой надежности и предсказуемой производительности.

§ 3. Сценарии применения и целевые показатели

Современные беспроводные сети сталкиваются с растущими требованиями к производительности, обусловленными появлением новых приложений и сервисов. Разрабатываемая технология Wi-Fi 8 (стандарт IEEE 802.11bn) призвана ответить на эти вызовы, обеспечив сверхвысокую надежность, предсказуемо низкую задержку и повышенную энергоэффективность для различных сценариев использования. В данном параграфе рассматриваются ключевые сценарии применения и соответствующие целевые показатели производительности.

3.1. Сценарии

Расширенная реальность. Приложения расширенной реальности (XR), объединяющие дополненную, виртуальную и смешанную реальность, представляют собой одну из наиболее перспективных и быстро развивающихся областей. Такие приложения как потоковая передача видеоизображения сверхвысокого разрешения на беспроводные гарнитуры, игры, сервисы метавселенной и цифровые двойники, предъявляют исключительно высокие требования к пропускной способности [3, doc.: 22/0030r1, 22/0059r0, 22/0697r0]. Сложные виртуальные среды часто обрабатываются удаленно в облаке, и готовые изображения должны доставляться на гарниту-

ру с минимальной задержкой. Типичные требования для приложений XR [3, doc.: 22/0952r0] включают:

- пропускную способность на одно устройство до нескольких Гбит/с,
- задержку менее 20 мс,
- долю потерянных пакетов менее 10^{-5} .

Промышленный интернет. К промышленному интернету относят робототехнику, автоматизацию производства, интеллектуальное сельское хозяйство и системы мониторинга. Недорогие устройства, такие как датчики, по отдельности не требуют высокой пропускной способности, но в совокупности генерируют значительный трафик [43]. Подобные приложения нуждаются в чрезвычайно надежных соединениях и стабильной передаче данных [3, doc.: 22/1919r5]. Типичные требования включают [42]:

- задержку до 1 мс с минимальным джиттером,
- долю потерянных пакетов не выше $10^{-7} \dots 10^{-3}$.

Плотные сети. Повсеместное использование Wi-Fi приводит к формированию плотных сетей, где десятки точек доступа работают в непосредственной близости [3, doc.: 22/0030r1], что существенно влияет на их производительность [3, doc.: 22/1809r0]. В таких условиях может одновременно передаваться трафик потокового видео высокого разрешения или онлайн-игр. Ключевой задачей в подобных сценариях является обеспечение для множества устройств качества обслуживания, сопоставимого с работой в идеальных условиях. Конкретные требования включают:

- скорость передачи данных на пользователя от нескольких Мбит/с до Гбит/с [3, doc.: 22/1919r5],
- задержку в несколько десятков миллисекунд [3, doc.: 22/0030r1],
- долю потерянных пакетов менее 10^{-3} .

3.2. Обзор ключевых показателей эффективности. На основе анализа представленных сценариев применения можно выделить ключевые показатели эффективности (англ.: Key Performance Indicators, KPI). Ниже рассматриваются целевые показатели, заявленные разработчиками стандарта 802.11bn [3, doc.: 23/0480r3, 23/0079r10]. Важно отметить, что целью стандарта является достижение этих KPI как в изолированных сетях, так и в условиях множества перекрывающихся сетей.

Пропускная способность. Большинство рассмотренных сценариев требуют существенного повышения пропускной способности. Согласно прогнозам, к 2030-м годам потребности пользователей составят около 2 Гбит/с [3, doc.: 22/0694r0]. Однако увеличение номинальной пропускной способности не всегда приводит к реальному улучшению качества обслуживания, особенно для пользователей на границе зоны покрытия. Поэтому стандарт 802.11bn ориентирован на повышение практической пропускной способности в условиях низкого отношения сигнал-интерференция-шум (SINR).

По сравнению с 802.11be стандарт 802.11bn нацелен на увеличение пропускной способности на 25% при различных уровнях SINR.

Задержка. Гарантированно низкая задержка критически важна для приложений расширенной реальности (до 20 мс) и промышленного интернета (до 1 мс) [3, doc.: 22/1919r5, 22/0779r0].

Следует отметить, что, хотя одной из целей Wi-Fi 7 было обеспечение низких задержек, на практике его функционал не всегда позволяет достичь этой цели. Например, механизм защищенного назначенного времени пробуждения (R-TWT), разработанный специально для снижения задержек, может работать неэффективно из-за интерференции со стороны устаревших устройств и устройств Wi-Fi 7 из соседних сетей. Другим источником значительных задержек является переключе-

ние мобильного устройства между точками доступа. Длительные процедуры такого переключения увеличивают задержки доставки пакетов сверх допустимых для приложений пределов [3, doc.: 22/1874r2]. Таким образом, улучшение механизмов переключения стало одной из задач 802.11bn.

В результате разработчики намерены снизить 95-й процентиль задержки на 25% по сравнению с 802.11be.

Надежность. Как следует из названия исследовательской группы (UHR – Ultra High Reliability), обеспечившей запуск разработки 802.11bn, обеспечение высокой надежности является главным приоритетом.

Под надежностью чаще всего понимается низкая доля потерянных пакетов. Например, в сценариях управления промышленными роботами необходима чрезвычайно низкая доля потерь при передаче команд, так как это может привести к серьезным сбоям и потере дорогостоящего оборудования.

В более широком смысле надежность связана со способностью поддерживать требуемую производительность в наихудших условиях. Иными словами, она означает гарантированное достижение ключевых показателей эффективности, таких как пропускная способность и задержка, в различных, в том числе неблагоприятных, условиях.

Разработчики 802.11bn планируют снизить долю потерянных пакетов на 25%, в том числе при переключении между точками доступа.

Энергопотребление. Энергоэффективность – еще один ключевой показатель для Wi-Fi 8. Недорогие устройства с питанием от аккумуляторов пользуются высоким спросом, и для них энергосбережение особенно важно. Кроме того, как обычные пользователи, так и организации все чаще уделяют внимание сокращению энергопотребления своего оборудования [3, doc.: 23/1254r1], стремясь повысить энергоэффективность устройств в целом, включая точки доступа [3, doc.: 23/0244r2].

В рамках 802.11bn планируется внедрить несколько нововведений, направленных на улучшение механизмов энергосбережения для различных типов устройств.

3.3. Хронология разработки Wi-Fi 8. Анализируя процесс разработки предыдущих стандартов, 802.11ax и 802.11be, можно ожидать, что полный цикл развития стандарта 802.11bn займет 5–6 лет [3, doc.: 22/0046r1, 22/0059r0].

Исследовательская группа UHR, ответственная за определение области применения стандарта, начала работу в сентябре 2022 года с целью формулирования требований для будущих сценариев.

Затем в июле 2023 года была создана рабочая группа TGbn, первое заседание которой состоялось в ноябре 2023 года. Эта группа занимается непосредственной разработкой технологий для повышения надежности, пропускной способности, снижения задержек и энергопотребления [3, doc.: 22/0708r0, doc.: 24/0209r15]. Черновая версия 0.1 была завершена в феврале 2025 года, D0.3 – в июне 2025 года [44], а первая полноценная черновая версия 1.0 – в сентябре 2025 года. Черновые версии 2.0 и 3.0 ожидаются к маю 2026 года и январю 2027 года соответственно. Публикация готового стандарта ожидается в 2028 года. Следует отметить, что устройства, поддерживающие функции Wi-Fi 8, вероятно, появятся на рынке раньше, например, в 2027 году, но будут отвечать большинству требований, связанных с ИМТ-2030 [3, doc.: 22/0961r0, 21/1809r0], [4].

§ 4. Краткий обзор Wi-Fi 8

Для достижения амбициозных целей Wi-Fi 8 стандарт 802.11bn предоставит широкий спектр нововведений. Представим краткий обзор нового функционала

Соответствие механизмов Wi-Fi 8 ключевым показателям эффективности

Группа	Пропускная способность	Задержка	Надежность	Энергопотребление
PHY Пункт 4.1 и § 5	mmWave LC Сжатие CSI Формирование луча в UL		DRU [✓] IMP [✓] UEQM [✓] новые СКК [✓] Улучшения МПП [✓] Кадр дальней связи [✓] Формирование луча	
MAC Пункт 4.2 и § 6	DSO [✓] DBE [✓]	P-EDCA [✓] Вытеснение	Периодическая работа с недоступностью [✓] Динамическая работа с недоступностью [✓]	
	NPCA [✓] Улучшения P2P [✓] Улучшения сигнализации QoS [✓]			Динамическое энергосбережение [✓] Межканальное энергосбережение [✓] Плановое энергосбережение ТД [✓]
Координация сетей Wi-Fi Пункт 4.3 и § 7		SMD, Беспроводной роуминг [✓]		Координация AP
		Co-CR [✓] Co-R-TWT [✓] Co-TDMA [✓]		
	Co-OFDMA			
		Co-SR [✓] Co-BF [✓] J-TX		

Примечание: \mathcal{F}^{\checkmark} указывает, что механизм \mathcal{F} был включен в проект D0.3 спецификации 802.11bn. [44].

Wi-Fi 8, сгруппированного в три категории: для физического уровня, для подуровня доступа к среде и для координации нескольких точек доступа. Более подробное описание нововведений представлено в §§ 5–7. Обзор также охватывает важные механизмы, которые не были включены в текущую черновую версию стандарта, но активно обсуждались в ходе разработки 802.11bn.

В табл. 2 новые решения Wi-Fi 8 (включая потенциальные) из трех групп, указанных выше, сопоставлены с ключевыми показателями эффективности, представленными в п. 3.2, а также явно отмечено, какие из решений уже вошли в стандарт 802.11bn.

4.1. Нововведения физического уровня. В отличие от предыдущих поколений Wi-Fi, 802.11bn не предлагает улучшения параметров физического уровня, увеличивающих лишь номинальные скорости передачи данных. Большинство возможностей увеличения производительности на физическом уровне уже исчерпаны, поэтому такие нововведения лишь незначительно увеличивали бы теоретически возможную скорость передачи данных ценой роста стоимости и сложности устройства. Как результат, стандарт 802.11bn отдает приоритет производительности в диапазоне низких и средних значений отношения мощности сигнала к шуму и интерференции.

Большое внимание уделяется нововведениям, повышающим надежность передачи, а также обеспечивающим большие скорости на дальние расстояния.

Одним из важных нововведений физического уровня являются распределенные по поднесущим ресурсные блоки (англ.: Distributed-tone Resource Units, DRU). При использовании DRU мощность передачи распределяется по более широкому каналу. Это позволяет увеличить мощность передачи станций в восходящем потоке, оставаясь в рамках нормативных ограничений по спектральной плотности мощности.

Чтобы помочь станциям повысить надежность приема, стандарт 802.11bn позволяет добавить пилотные поднесущие для подавления помех (англ.: Interference Mitigation Pilots, IMP). Введение неравномерной модуляции (англ.: Unequal Modulation, UEQM) повышает надежность за счет применения различных видов модуляции к различным пространственным потокам. Для поддержки UEQM введены дополнительные сигнально-кодированные конструкции, которые формируются на основе существующих модуляций и скоростей кодирования. Новые сигнально-кодированные конструкции и в отрыве от UEQM могут дополнительно улучшить скорость на больших расстояниях. Wi-Fi 8 также повышает эффективность кодирования LDPC за счет удвоения максимальной длины кодового слова.

Наконец, в 802.11bn определен новый формат кадра Enhanced Long Range (ELR), который обещает повысить производительность пользователей на границе сети благодаря четырехкратному дублированию данных и специализированной преамбуле.

4.2. Нововведения подуровня управления доступом к среде. Стандарт 802.11bn включает в себя несколько нововведений для доступа к каналу с малой задержкой. Первое нововведение – приоритизированный EDCA (англ.: Prioritized EDCA, P-EDCA), который позволяет станции со срочным кадром быстро получить доступ к каналу почти без конкуренции. Для этого станция посылает сигнал резервирования (англ.: Defer Signal), который временно исключает из соревнования за доступ к каналу все станции с несрочным трафиком. Второе нововведение – доступ к среде в запасном канале (англ.: Non-primary Channel Access, NPCA), если основной занят. Третье нововведение, рассматриваемое для 802.11bn, – это так называемое «вытеснение текущей передачи» (англ.: Preemption), механизм остановки текущей передачи и начала новой срочной передачи, также снижающий максимальную задержку. Чтобы уменьшить задержки при прямом обмене данными между клиентскими устройствами Wi-Fi (P2P), 802.11bn позволяет выделить TXOP группе станций, внутри которого они могут эффективно пересылать друг другу данные. Кроме того, 802.11bn позволяет точке доступа координировать взаимодействие P2P вне ее основного канала с целью уменьшения интерференции от других сетей.

Для более эффективного использования радиочастотных ресурсов в сетях Wi-Fi дополнение 802.11bn вводит несколько методов динамического управления рабочим каналом. Первый метод, динамическое управление поддиапазонами (англ.: Dynamic Subband Operation, DSO), позволяет точке доступа с более широкой полосой, чем у ассоциированных с ней клиентских станций, выделять им частотные ресурсы, выходящие за пределы их рабочего канала. Второй метод, динамическое расширение полосы (англ.: Dynamic Bandwidth Expansion, DBE), позволяет точке доступа временно увеличивать рабочую полосу сети.

Еще одним важным нововведением является уведомления о недоступности (англ.: Unavailability Reporting). Такая недоступность возникает из-за работы в устройстве других радиотехнологий, создающих нежелательные наводки сигнала. Когда устройство использует эти технологии, она не может принимать или передавать кадры Wi-Fi. Введенное уведомление сообщает другим станциям о таких интервалах недоступности, и эти станции будут избегать передачи кадров в указанные интервалы недоступности устройству.

Уведомления о недоступности используются и для уменьшения энергопотребления точками доступа. С помощью таких уведомлений точка доступа может со-

общить о плановом переходе в режим сна. На это время и подключенные к сети станции могут выключить свои радиомодули для экономии энергии. Для дальнейшего уменьшения потребления энергии 802.11bn вводит динамический режим энергосбережения, как для точек доступа, так и для клиентских станций Wi-Fi. Новый метод позволяет устройствам переключаться между режимами с низкой пропускной способностью (и меньшим энергопотреблением) и с максимальной пропускной способностью. Наконец, планируется дополнить метод для межканального управления энергосбережением. Это позволит использовать один «служебный» канал для сообщения о состояниях других каналов.

4.3. Нововведения для координации сетей Wi-Fi. В настоящее время при перемещении устройств между сетями Wi-Fi часто возникают высокие задержки и потери передаваемых данных. Для исправления этой проблемы в 802.11bn предлагается концепция *домена бесшовной мобильности* (англ.: Seamless Mobility Domain, SMD), который охватывает несколько многоканальных точек доступа. В пределах SMD контекст соединения станций, т.е. состояния автоматов, порядковые номера кадров, ключи безопасности и т. д., может свободно передаваться между точками доступа, то есть между сетями Wi-Fi. Такая координация сокращает время недоступности сети и снижает долю потерь при перемещении клиентского устройства из одной сети Wi-Fi в другую. SMD также реализует пошаговый переход клиентского многоканального устройства между точками доступа с последовательным переключением нескольких каналов, что обеспечит непрерывное подключение.

Помимо беспроводного роуминга, 802.11bn определяет набор схем координации между несколькими точками доступа, что является, пожалуй, ключевыми нововведениями технологии Wi-Fi 8. Схемы координации работают с уже существующими механизмами Wi-Fi – R-TWT, SR, BF и другие – и улучшают их эффективность за счет снижения взаимной интерференции между соседними сетями. Соответственно, в 802.11bn представлены Co-RWT, Co-SR, Co-BF и другие схемы Multi-AP, каждая из которых различается по целям, эффективности, сложности и накладным расходам.

В следующих параграфах приводится подробное описание всех вышеперечисленных нововведений.

§ 5. Нововведения физического уровня.

5.1. Экстенсивные нововведения больше не нужны? Из теоремы Шеннона следует, что наилучшим подходом к повышению производительности Wi-Fi являются экстенсивные улучшения на физическом уровне, например, увеличение ширины канала. Однако Wi-Fi приблизился к своим технологически оправданным пределам: модуляции более высокого порядка, дополнительные антенны и более широкие каналы скорее существенно усложняют устройства Wi-Fi, увеличивая их стоимость и энергопотребление, чем приносят ощутимую практическую пользу [3, doc.: 22/0729r1].

В 802.11be порядок модуляции был увеличен до 4096-QAM, и дальнейшее увеличение в настоящее время не имеет смысла. Внедрение 16K-QAM даст лишь 16,7% прироста номинальной пропускной способности по сравнению с 4096-QAM, но такая модуляция сложна в реализации с высокой точностью и применима только в идеальных условиях канала.

Максимальное число пространственных потоков в MIMO достигло восьми еще в стандарте 802.11ac и не менялось с 2012 года. Многие современные устройства все еще имеют не более четырех антенн. В стандарте 802.11be первоначально предполагалось увеличить число потоков до 16, но от этой идеи отказались из-за большого размера радиоприемников и значительных накладных расходов на процедуру измерения канала [32]. Тем не менее, если удастся решить проблему накладных расхо-

дов, увеличение числа потоков может стать нововведением следующего поколения Wi-Fi 9 [3, doc.: 22/1580r1].

Ширина канала была увеличена до 320 МГц в 802.11be, однако на практике каналы шириной 160 МГц и более используются не чаще, чем в 1% случаев [3, doc.: 22/1580r1]. Таким образом, дальнейшее расширение каналов в классических диапазонах (до 7 ГГц) не принесет существенной пользы в реалистичных сценариях.

5.2. Новые диапазоны. Из-за нехватки радиочастот в диапазоне менее 7 ГГц перспективным является освоение альтернативных частот и организация совместной работы во всех доступных полосах.

Миллиметровые волны. Расширение работы в диапазон миллиметровых волн (англ.: mmWave) является важным направлением дальнейшего развития. В диапазоне миллиметровых волн от 45 ГГц до 72 ГГц во всем мире имеется значительный объем нелицензируемых частот, что открывает возможности для увеличения пропускной способности и обеспечения требуемого качества обслуживания [3, doc.: 22/1580r1].

Несмотря на преимущества в пропускной способности, работа в миллиметровом диапазоне имеет серьезные ограничения. Во-первых, это повышает сложность и стоимость устройств. Во-вторых, миллиметровые диапазоны характеризуются малым радиусом действия, что снижает надежность связи на больших расстояниях. Наконец, работа на высоких частотах вызывает такие проблемы, как смещение несущей частоты (англ.: Carrier Frequency Offset, CFO), фазовый шум, нелинейность усилителя мощности и др. [3, doc.: 22/1395r0, 22/1865r1, 23/0066r2].

Авторами [3, doc.: 23/0165r2] приведена оценка реалистичных скоростей для клиентских устройств в диапазоне 60 ГГц по сравнению с существующими решениями в диапазоне до 7 ГГц. Авторы отмечают, что работа в миллиметровом диапазоне требует использования более низких скоростей кодирования и меньшего числа пространственных потоков, чем в классических диапазонах. Согласно результатам [3, doc.: 23/0165r2] диапазон 60 ГГц не позволяет значительно повысить скорость передачи данных, несмотря на более широкий канал. Таким образом, использование миллиметрового диапазона не может считаться универсальным решением, поскольку его преимущества в реальных сценариях остаются сомнительными.

Именно поэтому данная тема рассматривается отдельной рабочей группой Integrated mmWave (IMMW) TG, которая начала разработку стандарта 802.11bq в 2025 году. Эта группа фокусируется на неавтономной работе в нелицензируемых диапазонах mmWave с использованием OFDM-передачи для одиночного пользователя (англ.: Single User, SU) [3, doc.: 24/0116r7, doc.: 24/0549r6]. В отличие от предыдущих попыток освоения миллиметрового диапазона в Wi-Fi (802.11ad и 802.11ay [45]), цель 802.11bq заключается в максимально возможном повторном использовании классического РЧУ из диапазона до 7 ГГц для упрощения устройств и снижения их стоимости. Кроме того, в отличие от 802.11ad и 802.11ay, которые предусматривают автономную работу в миллиметровом диапазоне, дополнение 802.11bq требует от устройств поддержки как минимум одного из традиционных диапазонов. Это означает, что устройства IMMW должны работать совместно с классическим Wi-Fi в рамках архитектуры MLO. Такой подход обеспечивает базовую связь и передачу управляющих кадров по надежным каналам на частотах ниже 7 ГГц, используя при этом высокопроизводительный, но менее надежный миллиметровый канал преимущественно для быстрой передачи больших объемов данных.

Хотя поддержка миллиметрового диапазона не включена непосредственно в стандарт 802.11bn, работы над обоими стандартами (802.11bn и 802.11bq) будут завершены примерно в одно время. Таким образом, согласно некоторым источникам [8],

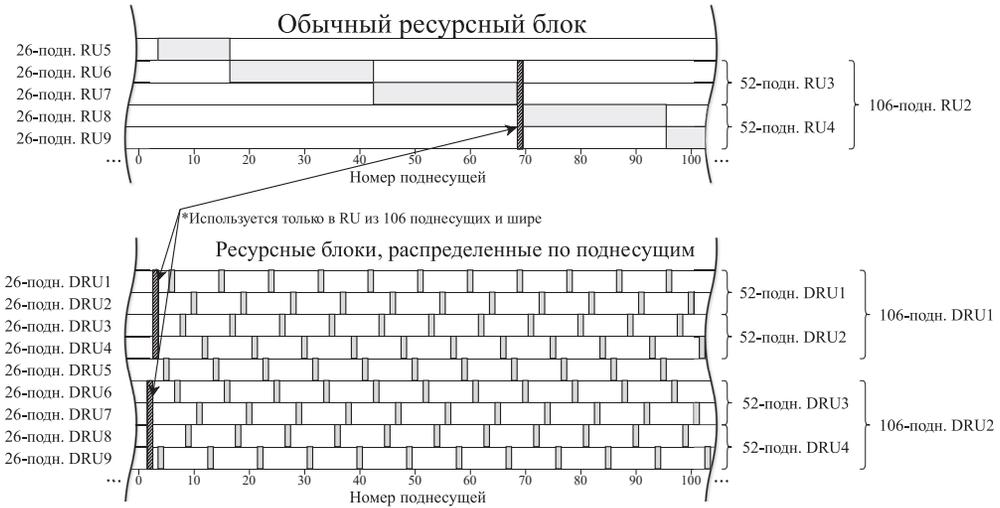


Рис. 1. Схема распределения поднесущих для обычных ресурсных блоков и для ресурсных блоков, распределенных по поднесущим, в канале шириной 20 МГц [44]

устройства, поддерживающие Wi-Fi 8 в широком смысле (стандарт IEEE 802.11 2030-х годов), вероятно, будут поддерживать миллиметровый диапазон.

Видимый свет. Под влиянием идеи интеграции работы в миллиметровом диапазоне, сообщество также предложило использовать инфракрасный и видимый свет для передачи данных. Недавно опубликованный стандарт 802.11bb [46, 47] гармонизирован с 802.11ax, но не с 802.11be и 802.11bn, поэтому он лишен многих ключевых механизмов, таких как многоканальная работа, и требует обновления. Эта идея развивается в рамках проекта по улучшению связи в световом диапазоне (англ.: Enhanced Light Communication, ELC), начатого в сентябре 2024 года, с продолжением под эгидой группы 802.11br TG [3, doc.: 24/0185r2, doc.: 24/16000r5]. Этой группе предстоит рассмотреть возможность использования оптических диапазонов и, аналогично mmWave, организовать их совместную работу с классическими диапазонами до 7 ГГц.

5.3. Улучшение надежности передачи. Хотя 802.11bn не повышает номинальную пропускную способность, стандарт определяет несколько механизмов для улучшения пропускной способности на больших расстояниях и в условиях плотных сетей.

Ресурсные блоки, распределенные по поднесущим. Одна из целей 802.11bn – улучшить производительность для клиентских устройств на границе сети. Для них характерна низкая мощность принимаемого сигнала. Однако простое увеличение мощности передачи невозможно из-за нормативных ограничений по спектральной плотности мощности. Например, в диапазоне 5 ГГц устройство не может излучать более 17 дБм/МГц [3, doc.: 23/0037r0].

Разработчики 802.11bn преодолели это ограничение, введя ресурсные блоки с распределенными поднесущими (англ.: Distributed-tone Resource Units, DRU, см. [44] и [3, doc.: 23/0037r0]). Идея заключается в распределении небольшого числа поднесущих по широкой полосе частот (см. рис. 1), что позволяет увеличить мощность передачи в пределах, установленных нормативными требованиями в терминах

узкого участка полосы. Такой подход обеспечивает прирост мощности до 11 дБ при распределении поднесущих по каналу шириной 80 МГц [3, doc.: 23/0037r0].

Несколько устройств могут использовать различные DRU в режиме восходящего канала OFDMA, аналогично обычным ресурсным блокам. DRU ортогональны друг другу по частоте и могут использоваться одновременно несколькими станциями, каждая из которых может увеличить свою мощность передачи и общую спектральную эффективность.

В 802.11bn для DRU поддерживаются ширины каналов {20, 40, 60, 80} МГц, по которым распределяются поднесущие DRU. Аналогично иерархической структуре обычных ресурсных блоков, широкие DRU используют DRU с 26 поднесущими в качестве фундаментальной единицы, причем более крупные DRU объединяют поднесущие меньших DRU, как показано на рис. 1. Важно отметить, что поддержка полосы 60 МГц указывает на возможность работы DRU с прокалыванием преамбулы (см. п. 2.6), то есть DRU может занимать 60 МГц в канале 80 МГц, исключая оставшийся подканал 20 МГц. TGbn также предлагала ввести поддержку полосы до 160 МГц в качестве опциональной возможности [3, doc.: 23/1448r0, 23/1988r2, 24/0500r0], но это предложение не было включено в текущую версию проекта стандарта [44].

Таким образом, каждый DRU охватывает только сегмент канала шириной 80 МГц. Эта особенность позволяет формировать блоки данных протокола PHY (англ.: PHY Protocol Data Unit, PDU), состоящие из обычных ресурсных блоков и распределенных в различных 80 МГц подканалах широких каналов [3, doc.: 24/0400r0, 24/0014r0]. Это, в свою очередь, позволяет одновременно передавать данные устройствам разных поколений, в том числе тем, которые не поддерживают DRU.

Поскольку в DRU поднесущие находятся на значительном расстоянии друг от друга, возникает проблема назначения пилотных поднесущих. Напомним, что пилотные поднесущие имеют заранее определенную фазу и предназначены для точной коррекции смещения несущей частоты (CFO). Группа TGbn также рассматривает вопросы подавления межканальных помех и улучшения сглаживания характеристик канала [44]. В результате пилотные поднесущие DRU спроектированы таким образом, чтобы иметь достаточное разделение, оставаясь при этом удаленными от центральных и краевых (защитных) поднесущих [44]. Примечательно, что пилотные поднесущие больших DRU объединяют подмножества пилотных поднесущих меньших DRU, формируя хорошо распределенный набор пилотных поднесущих.

Пилотные поднесущие для подавления помех. Случайные непредсказуемые помехи в нелицензируемых диапазонах являются одной из основных причин ограниченной надежности беспроводных локальных сетей [3, doc.: 24/1264r0]. Традиционные методы повышения надежности, такие как использование более надежных схем модуляции и кодирования (MCS), повторная передача кадров или переключение каналов, обычно оказываются недостаточными в условиях таких помех.

Для решения этой проблемы в 802.11bn вводятся пилотные поднесущие для подавления помех (англ.: Interference Mitigation Pilots, IMP). IMP представляют собой поднесущие, которые занимают место поднесущих данных и содержат заранее известный сигнал. IMP помогают подавлять помехи любой ширины полосы, возникающие в любой момент времени в течение передачи кадра. Благодаря этим поднесущим многоантенный приемник может обнаруживать и подавлять помехи, используя, например, алгоритм минимальной вариации без искажений (англ.: Minimum Variance Distortionless Response, MVDR) [3, doc.: 23/1490r1].

Результаты моделирования [3, doc.: 24/1264r0] показывают, что IMP улучшает отношение мощности сигнала к шуму и интерференции более чем на 10 дБ [3, doc.: 23/1490r1], когда новые пилотные поднесущие занимают 16–20% поднесущих. Это

Схемы с неравномерной модуляцией (UEQM) [44]

Число пространственных потоков	Схема UEQM			
	Поток № 1	Поток № 2	Поток № 3	Поток № 4
2	S	$S - 1$	–	–
	S	$S - 2$	–	–
3	S	S	$S - 1$	–
	S	S	$S - 2$	–
	S	$S - 1$	$S - 2$	–
4	S	S	S	$S - 1$
	S	S	S	$S - 2$
	S	S	$S - 1$	$S - 2$
	S	$S - 1$	$S - 1$	$S - 2$

означает, что IMP позволяет поддерживать работу с высокоскоростными MCS даже в условиях помех, значительно увеличивая пропускную способность.

В предложении [3, doc.: 25/0808r0] рассматривается возможность использовать три дополнительных IMP на ресурсный блок с 26 поднесущими, а также удваивать количество IMP для каждого последующего ресурсного блока большей ширины. Это приведет к накладным расходам около 9–12% на IMP, но этого будет достаточно для существенного повышения отношения мощности сигнала к мощности шума [3, doc.: 25/0808r0]. IMP также позволяют достичь низкого и стабильного уровня ошибок при высокой пропускной способности, что способствует более быстрой сходимости и устойчивости алгоритмов адаптации к состоянию канала.

Отметим, что IMP менее применимы в сценариях нисходящего канала MU-MIMO, где станции обычно имеют меньше антенн, чем требуется для эффективного подавления интерференции от потоков, предназначенных другим пользователям [3, doc.: 24/1785r2]. Для создания аналогичного метода подавления помех в DL MU-MIMO требуются дополнительные исследования.

Техника IMP также может улучшить повторное пространственное использование радиоресурсов, поскольку приемник становится более устойчивым к помехам от перекрывающихся сетей. Это упрощает ведение одновременной передачи в соседних сетях без создания взаимной интерференции. Таким образом, IMP обладает значительным потенциалом для использования в плотных сетях.

Неравномерная модуляция и новые СКК. В системах MIMO разным пространственным потокам соответствует свое затухание в канале. Это означает, что для достижения высокой спектральной эффективности необходимо использовать разные скорости передачи информации в разных пространственных потоках. Однако в текущем стандарта 802.11 закодированные биты распределяются равномерно между всеми потоками, и для их передачи используется одна и та же сигнально-кодовая конструкция.

Для решения этой проблемы в 802.11bn вводится механизм неравной модуляции (англ.: Unequal Modulation, UEQM), который позволяет использовать различные схемы модуляции в разных пространственных потоках [44], сохраняя при этом общую кодовую конструкцию. Преимущество UEQM заключается в возможности адаптации порядка модуляции к отношению мощности сигнала к шуму и интерференции каждого пространственного потока. Использование UEQM позволяет получить выигрыш в производительности более 2 дБ [3, doc.: 24/0498r4, 24/0474r3].

		Старые СКК (802.11be)		Новые СКК				
		Модуляция						
		BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM	1024-QAM	4096-QAM
Кодовая скорость	1/2	СКК 0	СКК 1	СКК 3				
	2/3				СКК 5			
	3/4		СКК 2	СКК 4	СКК 6	СКК 8	СКК 10	СКК 12
	5/6				СКК 7	СКК 9	СКК 11	СКК 13

Рис. 2. Сетка сигнально-кодовых конструкций в Wi-Fi (исключая Dual Carrier Modulation)

Примечательно, что аналог UEQM был определен в стандарте 802.11n, но в то время редко использовался в реальных устройствах из-за высокой сложности. Впоследствии эта функция была удалена в стандарте 802.11ac [25]. Однако с учетом современного внимания к надежности данная идея возрождается.

Для ограничения сложности в стандарте поддерживаются только схемы UEQM, перечисленные в табл. 3, где S обозначает модуляцию 2^{2S} -QAM для потока с наибольшим отношением мощности сигнала к шуму и интерференции, $S \geq 1$. Текущая версия стандарта ограничивает использование UEQM только в однопользовательских передачах, поэтому число потоков ограничено четырьмя. Эти ограничения значительно упрощают механизм UEQM, например, позволяют указывать схемы UEQM всего парой битов, сохраняя при этом эффективность этого подхода.

Как было отмечено выше, UEQM использует разные модуляции, но одинаковые скорости кодирования. Для всех потоков применяется общий МПП-код. Эта особенность выявила недостаток существующей сетки СКК [3, doc.: 24/0498r4]: некоторые комбинации созвездий и скоростей кодирования не были определены. Например, как показано на рис. 2, скорости кодирования 2/3 соответствует только 64-QAM, что ограничивает применимость UEQM. Для решения этой проблемы сетка СКК была расширена несколькими недостающими комбинациями, выделенными на рис. 2. Новые СКК могут улучшить пропускную способность при средних значениях SINR на 30% и повысить пропускную способность на больших расстояниях, как с UEQM, так и без него [3, doc.: 24/0498r4, 24/0469r0].

Развивая идею UEQM для разных пространственных потоков, разработчики 802.11bn обсуждали аналогичный механизм для использования на разных поднесущих [3, doc.: 24/1132r0]. Идея заключается в использовании различных СКК на разных поднесущих или ресурсных блоках, что потенциально поможет бороться с частотно-селективными замираниями, подобно адаптивной загрузке битов (англ.: bit loading) в технологиях связи видимого света [47].

Усовершенствования МПП-кодов. МПП-кодирование в Wi-Fi впервые появилось в стандарте 802.11n. С тех пор скорость передачи данных значительно возросла, но длина кодовых слов осталась прежней, что привело к неоптимальной производительности кодирования. 802.11bn улучшает МПП-кодирование, удваивая максимальную длину кодового слова до $2 \times 1944 = 3888$ бит [44], [3, doc.: 23/1985r6].

Для включения более длинных кодовых слов в работе [3, doc.: 23/1985r6] предлагается использовать подход, ранее использовавшийся в стандартах 802.11. Матрицы проверки четности для 3888-битных кодовых слов строятся на основе новых, более

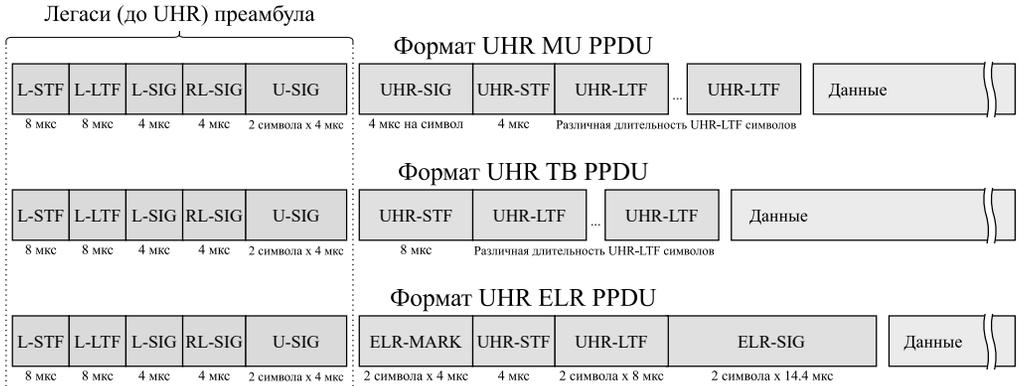


Рис. 3. Форматы UHR PPDU [44]

крупных прототипных матриц (экспоненциальных матриц), которые заполняются подблоками размером 81×81 , аналогично тому, как это делается для 1944-битных кодовых слов, начиная с 802.11n. Этот подход представляет собой хороший компромисс между производительностью и сложностью. Кроме того, он облегчает параллелизм декодирования. Результаты, представленные в [3, doc.: 23/1985r6], демонстрируют стабильный выигрыш в несколько децибел по отношению мощности сигнала к мощности шума и интерференции для высокоскоростных СКК.

Стандарт 802.11bn также повышает эффективность МПП-кодов для коротких кадров. При МПП-кодировании для согласования скорости в Wi-Fi 6 и Wi-Fi 7 количество кодовых битов округляется в большую сторону для заполнения четверти OFDM-символа. Однако последний OFDM-символ может остаться незаполненным кодовыми битами почти на $3/4$, а остаток дополняется незначащими битами [3, doc.: 24/1054r0]. Такое недоиспользование ресурсов канала особенно критично для коротких кадров длиной в несколько OFDM-символов. Стандарт 802.11bn устраняет эту неэффективность, изменяя процедуру округления до полных OFDM-символов. Данная модификация повышает надежность передачи коротких кадров, характерных для приложений промышленного интернета.

Кадр дальней связи. Wi-Fi 8 определяет три типа форматов кадров, показанных на рис. 3:

- **UHR MU** – наследован из предыдущих поколений Wi-Fi. Несмотря на название, используется для передачи данных как нескольким, так и одному пользователю.
- **UHR TB** – используется для передач в восходящем канале с OFDMA и MU-MIMO, выполняемых в ответ на триггер-кадр от точки доступа.
- **UHR Enhanced Long Range (ELR)** – специально добавлен в 802.11bn для улучшения надежности передачи на больших расстояниях. Особенно полезен для обмена кадрами с пользователями на границе сети.

Причиной для создания кадра ELR является неравенство в мощности приема между восходящим и нисходящим каналами. Точки доступа обычно используют значительно большую мощность передачи по сравнению с клиентскими станциями, с разницей до 10 дБ [3, doc.: 24/0875r1]. Формат кадра ELR PPDU обеспечивает выигрыш в 6 дБ, а оставшийся разрыв в мощности между восходящим и нисходящим каналами может быть компенсирован за счет усиления антенны и методов формирования луча [3, doc.: 24/0921r0]. Следовательно, ELR частично покрывает разрыв мощности приема, тем самым повышая надежность передачи кадров от станций на границе сети.

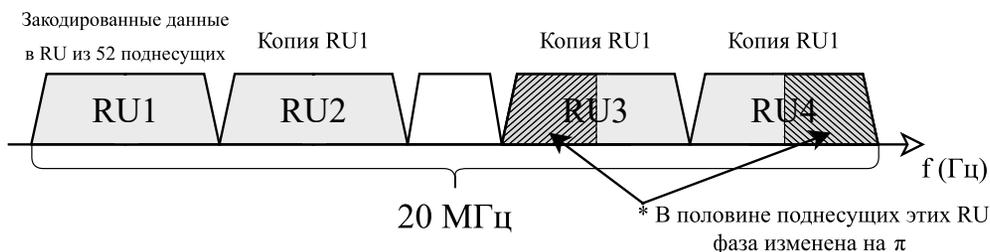


Рис. 4. Кодирование данных в UHR ELR PPDU [44]

Для достижения указанных 6 дБ данные в кадре ELR повторяются четыре раза в четырех ресурсных блоках в канале 20 МГц, как показано на рис. 4. На некоторых поднесущих данные инвертированы по фазе для уменьшения отношения пиковой мощности к средней [3, doc.: 24/1486r1], [44].

В кадрах ELR поддерживается только модуляция BPSK и QPSK со скоростью кодирования 1/2. Соответствующие скорости передачи данных на физическом уровне равны 1,67 Мбит/с и 3,33 Мбит/с. Преамбула кадра ELR, изображенная на рис. 3, также переработана для повышения надежности. Для обеспечения обратной совместимости она начинается с общей части, как и все кадры 802.11bn. Далее следует поле ELR-MARK из двух OFDM-символов, которое определяет тип кадра (ELR) и содержит информацию о цвете сети (англ.: BSS color) для ранней фильтрации кадров из чужих сетей [3, doc.: 24/1571r2]. Дополнительное поле ELR-SIG из двух OFDM-символов усиливает устойчивость к помехам за счет повторения важной информации из предыдущих полей, такой как СКК и цвет сети [3, doc.: 24/1485r2]. Кодирование ELR-SIG совпадает с вышеописанным кодированием поля данных, как на рис. 4.

5.4. Формирование диаграммы направленности и MIMO. Формирование диаграммы направленности (англ.: Beamforming, BF) и MIMO, являющиеся основными особенностями технологии Wi-Fi, остаются перспективными направлениями для увеличения пропускной способности при различных уровнях качества канала, а также для повышения надежности и сокращения задержек. Однако их эффективность сильно зависит от процедур измерения канала и формирования прекодера. Поэтому следующие особенности были обсуждены в исследовательской группе UHR и рабочей группе TGbn.

Сжатие информации о состоянии канала (CSI). Все методы BF опираются на информацию о состоянии канала (англ.: Channel State Information, CSI), которая включает матрицы обратной связи для каждой группы поднесущих. Передача этих матриц занимает значительное количество времени в канале, особенно при большом количестве поднесущих, антенн и устройств. В литературе разработано множество методов сжатия обратной связи, включая уменьшение импульсного отклика канала, дифференциальные повороты Гивенса, квантование с переменным углом, методы неявной обратной связи и многие другие [48–54]. Однако в текущий стандарт 802.11 включены только угловое разложение унитарных матриц и группировка поднесущих. При этом группа TGbn остается открытой для внедрения в стандарт метода «идеального» сжатия. Такой метод должен за незначительное увеличение вычислительной сложности обеспечивать значительный выигрыш в различных условиях канала, предпочтительно проверенный в реальных сценариях.

Формирование луча в восходящем канале. Еще одним перспективным направлением является внедрение BF для кадров в восходящем канале, передаваемых в ответ на триггер-кадр (англ.: Trigger-based PPDU, TB PPDU). В настоящее время точки доступа 802.11 не могут инструктировать станции о применении заданной диаграммы направленности в TB PPDU. Во время разработки спецификации 802.11ax этот функционал считался слишком сложным. Однако использование BF для длинных TB PPDU в восходящем канале обещает обеспечить выигрыш около 2–4 дБ во всем диапазоне SINR [3, doc.: 20/1672r2], что позиционирует BF в восходящем канале как важного метода обеспечения надежной связи в сетях Wi-Fi.

Как уже упоминалось, BF в TB UL требует процедуры для станций по выполнению измерения CSI, либо независимо от точки доступа, либо по ее запросу [3, doc.: 23/0263r0]. Традиционный подход использует пустые пакеты данных (англ.: Null Data Packet, NDP), отправляемые станциями, и последующий ответ точки доступа [3, doc.: 24/0243r2, 24/0869r0]. В отличие от этого, более инновационный подход предлагает неявное измерение канала, которое не требует обратной связи с точкой доступа, тем самым снижая накладные расходы [3, doc.: 22/1392r0]. В этом подходе точка доступа отправляет кадры NDP, а станции измеряют взаимный канал напрямую. Поскольку точка доступа имеет более высокую мощность передачи, чем станции, она обеспечивает более высокую точность измерений. Более того, сигналы NDP, по которым проводятся измерения, могут быть интегрированы в триггер-кадры, что экономит дополнительное время.

Теоретически, BF в восходящем канале также может внести вклад в схему координированного BF (Co-BF) Multi-AP (см. п. 7.8). Станции могут использовать прекодеры, которые уменьшают многопользовательские помехи на своей точке доступа, а также дополнительно устраняют помехи на активных устройствах в соседних сетях.

Сглаженное формирование луча. Перед применением BF приемник измеряет зашумленный канал и передает CSI. Поскольку CSI не является идеальным представлением канала, результирующее BF не является оптимальным, в первую очередь из-за прерывистой фазовой характеристики эффективного канала. Такая прерывистость вызвана различными факторами, и сглаженное BF предназначено для борьбы с этим эффектом [3, doc.: 22/1392r0].

Во-первых, в стандартной сжатой обратной связи CSI матрица обратной связи подвергается фазовому сдвигу по столбцам, что приводит к потере части информации [3, doc.: 22/1842r0]. Этот сдвиг вызывает ошибки BF на затухающих поднесущих. Информация о фазе может быть просто добавлена обратно [3, doc.: 23/1906r1] или восстановлена на приемнике с помощью сложных алгоритмов [55, 56].

Во-вторых, прерывистость также возникает, когда два сингулярных значения похожи [3, doc.: 05/1635r1]. При вычислении сингулярного разложения (англ.: Singular Value Decomposition, SVD) собственные каналы ранжируются по сингулярным значениям. Таким образом, когда сингулярные значения близки, соответствующие матрицы могут часто меняться местами, что приводит к потере когерентности и усложняет работу алгоритмов оценки и предсказания каналов. Для решения этих проблем вычисление SVD должно быть согласовано для всех поднесущих [3, doc.: 22/1413r1, 22/1869r1]. Кроме того, равные сингулярные значения приводят к проблемам с численной точностью при выполнении матричных операций.

В-третьих, при доставке CSI часто используется группировка частот. Передатчики выполняют интерполяцию, гладкость которой не гарантируется. Такие разрывы после интерполяции могут быть независимо устранены на стороне приемника или передатчика.

В-четвертых, неравномерность может возникнуть из-за углового квантования [3, doc.: 22/1842r0]. Алгоритмы BF могут решить эту проблему, применяя сглаживающий фильтр к матрице формирования луча на поднесущих или используя опцию тонкого квантования.

5.5. Открытые вопросы. С внедрением новых механизмов на физическом уровне в области Wi-Fi 8 появился ряд открытых проблем.

Технологии миллиметровых волн, хотя потенциально и обеспечивают высокую скорость передачи данных, имеют ряд особенностей, которые препятствуют их надежному развешиванию в динамичных беспроводных средах. Во-первых, эти волны легко заблокировать. Если путь прямой видимости или доминирующий путь распространения заблокирован, соединение, скорее всего, нарушается, и устройства должны иметь возможность вернуться для передачи данных в диапазон ниже 7 ГГц. Во-вторых, для поддержания достаточно высокой принимаемой мощности необходимо использовать формирование диаграммы направленности. Лучи должны быть одновременно узкими и точными, что особенно сложно, когда среда очень динамична и/или клиентские станции перемещаются. В-третьих, обеспечение точной направленности лучей приводит к значительным накладным расходам на измерение канала и поиск наилучшего направления луча. Существующие методы, решающие эту задачу, например, стандартизованные в 802.11ad и 802.11ay, имеют высокую задержку и снижают спектральную эффективность. Это делает необходимым создание более интеллектуальных алгоритмов. В частности, искусственный интеллект и машинное обучение предлагают мощные инструменты для поиска и управления лучом, но остается открытым вопрос, насколько эти методы применимы в реальных условиях с переменными во времени параметрами канала и шумом без большого количества тщательно размеченных обучающих данных. Наконец, методы формирования диаграммы направленности на практике должны явно учитывать аппаратные ограничения и искажения, присущие миллиметровым волнам. Такие недостатки, как высокий уровень фазового шума и нелинейные искажения усилителя мощности в условиях высокого отношения пиковой мощности к средней, влияют на точность и устойчивость диаграммы направленности. Кроме того, широкополосные аналого-цифровые преобразователи высокого разрешения потребляют значительную мощность, что ограничивает масштабируемость и побуждает к исследованию энергоэффективных гибридных архитектур прекодирования.

Что касается распределенных по поднесущим ресурсных блоков (DRU), то для проверки жизнеспособности этого механизма необходимо провести дополнительные исследования. Во-первых, метод множественного доступа с ортогональным частотным разделением (OFDMA) с использованием DRU может столкнуться с проблемами интерференции чередующихся поднесущих, передаваемых разными станциями. Здесь представляет интерес процесс синхронизации, поскольку станции могут иметь сильно различающиеся смещения несущей частоты. Во-вторых, если DRU окажутся единственным надежным методом связи для клиентских станций на границе сети, то DRU должен будет использоваться не только для передачи кадров данных, но и для служебных кадров. В-третьих, эффективность работы DRU не была исследована с точки зрения управления распределением радиоресурсов. Ресурсные блоки назначаются точкой доступа, но имеющейся на ней информации может быть недостаточно, чтобы понять, следует использовать обычные или распределенные ресурсные блоки [3, doc.: 24/1058r0].

Поддержка DRU может быть полезна не только в восходящем канале, но и в нисходящем канале. Заметим, что DRU отличаются друг от друга простым сдвигом по частоте не более чем на 2,2 МГц, а значит они все испытывают очень похожие каналные условия [3, doc.: 23/1516r0]. Другими словами, каждый DRU усредняет частотную избирательность всего широкого канала, и значения отношения мощности

сигнала к помехам и шуму будут практически одинаковыми. Следовательно, номер DRU можно исключить из алгоритма выбора сигнально-кодовой конструкции, что упрощает планирование ресурсов. Однако более точные исследования в подтверждение этой гипотезы все же необходимы.

Появление пилотных поднесущих для подавления помех (IMP) также ставит ряд задач. Во-первых, выбор режима IMP должен быть интегрирован в алгоритмы выбора сигнально-кодовой конструкции, поэтому требуются новые соответствующие алгоритмы [3, doc.: 24/1264r0]. Во-вторых, введенные IMP, помимо подавления помех, могут быть использованы для других целей. Например, они могут быть полезны для улучшенной компенсации смещения несущей частоты или для построения согласованного фильтра в процессе приема кадра при быстрых изменениях окружающей среды. Следует исследовать эти и другие дополнительные возможности, открываемые IMP.

Неравная модуляция (UEQM) – это, на первый взгляд, перспективное направление, но требуется больше исследований для достижения значимого прироста производительности. Текущие результаты исследований UEQM получены в предположении идеальной оценки канала и идеального алгоритма выбора сигнально-кодовой конструкции, поэтому на практике выигрыш может быть ниже. Учитывая, что использование UEQM в 802.11bn подразумевает только для многоантенных передач (MIMO), необходимо принимать во внимание влияние неидеального знания информации о состоянии канала (CSI) [3, doc.: 24/0890r1]. Кроме того, востребованы алгоритмы выбора сигнально-кодовой конструкции для UEQM [3, doc.: 24/0474r3, 24/1216r1]. Естественно, можно руководствоваться информацией об ожидаемых значениях отношения мощности сигнала к шуму и интерференции потоков, отправляемой STA во время процедуры измерения состояния канала. Однако, как именно следует опираться на эту информацию, еще не определено. Производительность UEQM с новым алгоритмом выбора схем следует сравнить с методом адаптивного распределения мощности.

Требуются исследования и эффективности работы кадров улучшенной дальней связи (ELR). Поскольку преамбула ELR особенно продолжительна, ее эффективность находится под сомнением. Альтернативным решением может стать обычное формирование луча на приемнике [3, doc.: 24/0921r0]. Во-вторых, станции столкнутся с проблемой обратной совместимости при использовании кадров RTS и CTS для защиты своей передачи кадров ELR [3, doc.: 24/1508r0]. Если кадры RTS/CTS не формата ELR, то они могут быть некорректно декодированы из-за помех. Напротив, кадры RTS/CTS формата ELR будут проигнорированы станциями, не поддерживающими новый формат. Использование нескольких кадров является потенциальным решением (например, сопровождение обмена ELR RTS/CTS обычными кадрами CTS-to-self и/или CTS [3, doc.: 24/1508r0]), но желательно найти более элегантное решение с низкими накладными расходами.

В заключение отметим гибридный автоматический запрос повторной передачи (англ.: Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ), который стабильно повышает надежность в сотовых системах. Было показано, что он обеспечивает выигрыш около 3–4 dB в сценариях Wi-Fi с многоантенными передачами (MIMO) [57]. К сожалению, многие разработчики стандарта отмечают сложность реорганизации HARQ в Wi-Fi, вызванную особенностями протоколов PHY и MAC, в частности несогласованностью кодовых слов и блоков данных на канальном уровне [3, doc.: 22/1880r1]. Для успешной реализации HARQ в Wi-Fi потребуются существенные архитектурные изменения, включая модификацию структуры кадров физического уровня и протоколов подтверждения приема на канальном уровне. В настоящее время эти проблемы не решены, поэтому внедрение HARQ откладывается до последующих поколений стандарта.

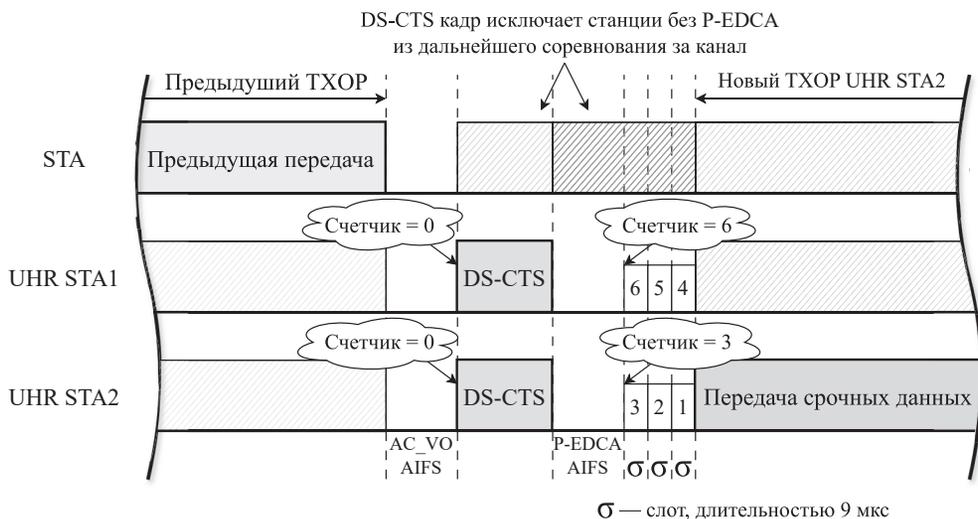


Рис. 5. Пример приоритетной операции EDCA (P-EDCA) (согласно [3, doc.: 23/1065r0])

§ 6. Нововведения подуровня управления доступом к среде

6.1. Доступ к среде с низкой задержкой. Хотя Wi-Fi уже поддерживает чрезвычайно высокую номинальную скорость и низкие задержки передачи данных, обеспечение гарантированного низкого времени доставки требует дальнейшего совершенствования. Явное узкое место связано со случайным и распределенным характером доступа к каналу Wi-Fi, т.е. улучшенным распределенным доступом к каналу (англ.: Enhanced Distributed Channel Access, EDCA) [3, doc.: 22/1519r0], который реализует множественный доступ с прослушиванием несущей и предотвращением коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA) со случайной отсрочкой. Хотя метод EDCA гарантирует справедливое распределение радиоресурсов и обратную совместимость, он не обеспечивает низких и детерминированных задержек. Отметим, что другие схемы доступа к каналу, например, доступ к каналу по триггер-кадру (англ.: Trigger-Based, TB), представленный в 802.11ax, работают поверх EDCA. В связи с этим Wi-Fi 8 стремится организовать доступ к каналу с низкой задержкой.

Приоритизированный EDCA. Разработчики 802.11bn впервые за несколько поколений решили разработать улучшенную версию EDCA для обеспечения гарантированных задержек. Эта версия должна оставить EDCA распределенным, чтобы оставаться работоспособным в сценариях с большим количеством пересекающихся сетей, а также не препятствовать обслуживанию устаревших устройств, которые не понимают новых правил.

Для этого в 802.11bn определен механизм приоритетного EDCA (англ.: Prioritized EDCA, P-EDCA) [3, doc.: 23/1065r0], [44], который направлен на уменьшение задержки доступа в канал и работает, как показано на рис. 5. В частности, P-EDCA делит станции на две группы: с приоритетным доступом и без него. Когда приоритетным станциям требуется доступ к каналу, они посылают кадр занятости канала (англ.: Defer Signal CTS, DS-CTS) почти сразу после того, как канал освободится, а именно после некоторого короткого межкадрового интервала и короткой отсрочки. Этот межкадровый интервал может быть равен арбитражному межкадровому

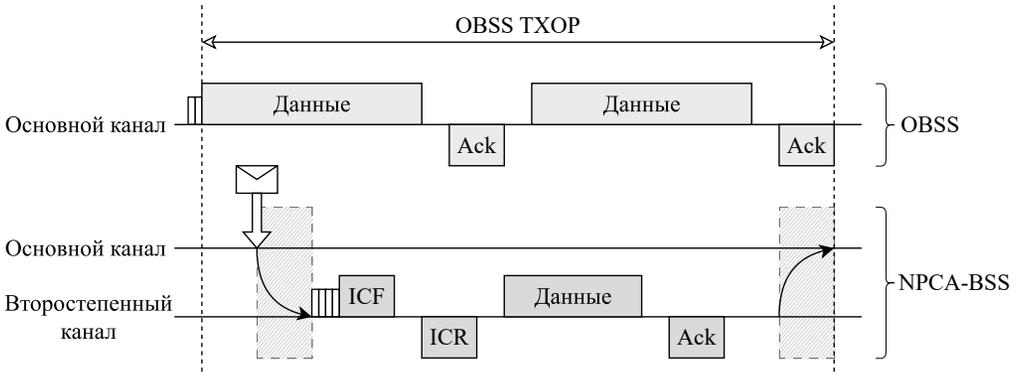


Рис. 6. Схема доступа к неосновному каналу (NPCA) (согласно [3, doc.: 24/0803r1])

интервалу (англ.: Arbitration Interframe Space, AIFS) для категории доступа голосового трафика (AC_VO), а конкурентное окно может быть малым или даже равным нулю, как показано на рис. 5. Эти значения соответствуют параметрам по умолчанию, рекомендованным текущей версией стандарта 802.11bn [44], и гарантируют, что доступ к каналу P-EDCA будет короче, чем время, которое требуется неприоритетным станциям для доступа к среде.

Получив кадр DS-CTS, другие станции либо приостанавливают свою процедуру соревнования за доступ благодаря механизму виртуальной занятости среды, либо откладывают доступ к каналу на длительное время расширения межкадрового интервала (англ.: Extended Interframe Space, EIFS), если они не могут декодировать DS-CTS. В результате приоритетные станции оказываются изолированными от других станций в канале. После кадра DS-CTS только отправившие его станции участвуют в обычном соревновании, но с использованием новых параметров для P-EDCA, рассылаемых точкой доступа. В частности, приоритетные станции ожидают P-EDCA AIFS, затем случайным образом инициализируют счетчик обратного отсчета и отсчитывают его, чтобы начать обмен кадрами.

Чтобы смягчить негативное влияние P-EDCA на неприоритетные станции, стандарт 802.11bn устанавливает дополнительные правила. Во-первых, только станции с трафиком, принадлежащим категории AC_VO , могут участвовать в конкуренции за канал с помощью P-EDCA. Как только конкуренция за канал начинается, станция приостанавливает работу очередей с трафиком других категорий. Во-вторых, станция может использовать P-EDCA только после достижения небольшого числа последовательных неудачных попыток передачи, например, двух. Кроме того, она может использовать P-EDCA только несколько раз подряд, например, только один раз.

Результаты моделирования [3, doc.: 23/1065r0, 23/2126r3, 24/0467r1] показывают, что P-EDCA в 3–4 раза уменьшает задержку в различных сценариях, сохраняя при этом производительность станций с неприоритетным трафиком.

Для улучшения характеристик задержки в восходящем канале (англ.: Uplink, UL) и средах с несколькими сетями, сигнал отсрочки может быть уникальным для каждой сети [3, doc.: 23/2126r3]. Кроме того, чтобы уменьшить вероятность коллизии кадров DS-CTS, некоторые исследователи [3, doc.: 24/1193r0] предлагают, чтобы станции могли решать, имеют ли они право отправить кадр DS-CTS, с помощью дополнительной рандомизированной процедуры, задающей приоритет станций.

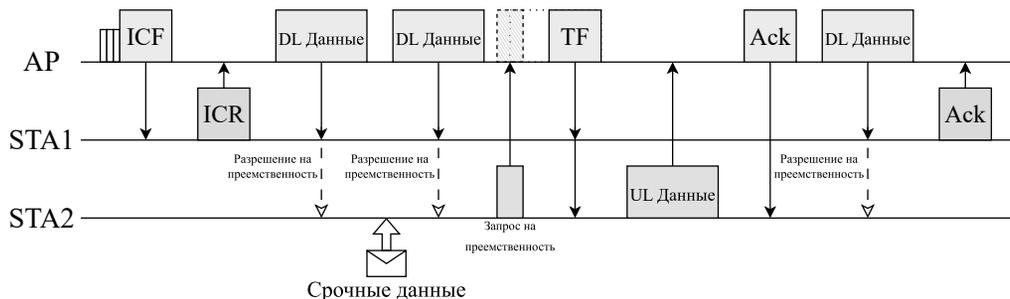


Рис. 7. Пример вытеснения в рамках TXOP (согласно [3, doc.: 24/0168r0])

Доступ к неосновному каналу. В сетях Wi-Fi любая передача в широком канале должна включать передачу в основной подканале шириной 20 МГц. Так, станция, работающая в канале 160 МГц, не может передавать, если ее основной подканал 20 МГц занят, даже если оставшиеся 140 МГц свободны. Чтобы решить проблему такого нерационального использования канала, стандарт 802.11bn определяет механизм доступа к неосновным каналам (англ.: Non-Primary Channel Access, NPCA), который позволяет станции получить доступ к второстепенному подканалу, в то время как основной подканал занят [17, 44], [3, doc.: 24/0803r1].

На рис. 6 показана общая схема механизма NPCA. Когда станция прослушивает основной подканал и обнаруживает, что он занят передачей из перекрывающейся сети (OBSS), станция может переключиться на другой второстепенный канал, называемый запасным подканалом NPCA, заранее определенный точкой доступа. Затем станция запускает новую процедуру отсрочки в этом запасном подканале. После получения TXOP, чтобы убедиться, что приемник также переключился на другой канал, станция инициирует обмен служебными кадрами. Первым идет начальный управляющий кадр (англ.: Initial Control Frame, ICF), в ответ на который отправляется начальный управляющий ответный кадр (англ.: Initial Control Response Frame, ICR) [3, doc.: 24/0829r0]. Когда основной подканал становится свободным, станция переключается обратно [3, doc.: 24/0070r2, 24/0496r1].

Результаты моделирования показывают, что NPCA обеспечивает значительный прирост пропускной способности за счет эксплуатации недоиспользуемых подканалов (см. [3, doc.: 23/0962r0] и [17]), а также снижает задержку ожидающего трафика.

Примечательно, что для снижения сложности NPCA разработчики 802.11bn согласились со следующими ограничениями [44]. Во-первых, NPCA не должна предполагать возможность обнаружения или декодирования кадра и получения информации о виртуальной занятости запасного подканала одновременно с основным подканалом. Во-вторых, сеть должна иметь только один запасной подканал NPCA в качестве альтернативы основному подканалу.

Вытеснение. Вытеснение – это механизм, позволяющий прервать текущую передачу для обслуживания трафика с более строгими требованиями к задержке [3, doc.: 24/0389r0]. Примечательно, что это один из недостающих компонентов, не позволяющих Wi-Fi полностью обеспечивать сетевое взаимодействие, чувствительное ко времени доставки данных (англ.: Time-Sensitive Networking, TSN) [42]. Несмотря на то что Wi-Fi 8 вряд ли будет включать в себя вытеснение, исследовательская группа UHR посвятила значительное время его обсуждению. Поэтому рассмотрим его ключевые принципы.

Предположим, что устройство передает длинный кадр с несрочным трафиком, когда в очередь внезапно поступают данные, требующие доставки с малой задерж-

кой. В этом случае устройство прерывает текущую передачу кадра и отправляет новый кадр с данными, чувствительными к задержке, тем самым выполняя вытеснение [3, doc.: 21/0670r0, 23/0018r1, 23/0092r0]. После этого устройство возобновляет отложенную несрочную передачу прерванного кадра, начиная с новой, хотя и потенциально укороченной, преамбулы.

Схемы вытеснения становятся более сложными, когда источник срочных данных не является текущим отправителем. Предположим, одна станция передает несрочный трафик, в то время как на второй станции в очередь поступают данные реального времени. Чтобы позволить второй станции выполнить вытеснение в рамках ТХОР [3, doc.: 23/0018r1, 23/0092r0, 23/1886r3], первая станция должна приостановить передачу несрочного трафика. Чтобы облегчить реализацию этой схемы, станции должны заранее договориться, иными словами, должна быть предварительно установлена выделенная сессия передачи данных с низкой задержкой [3, doc.: 24/0389r0]. Во время этой сессии первая станция сегментирует длинные кадры на более мелкие [3, doc.: 23/1229r1], создавая временные паузы между ними и сигнализируя о разрешении на вытеснение во время этих пауз. В этих паузах вторая станция может передавать кадры запроса на вытеснение [3, doc.: 23/0378r0, 24/0389r0], чтобы уведомить первую станцию о предстоящих срочных данных. Получив запрос на вытеснение, первая станция воздерживается от дальнейшей передачи данных, позволяя передавать трафик реального времени [3, doc.: 24/0168r0]. Если запрос на вытеснение не получен, то первая станция возобновляет передачу несрочного трафика, возможно, используя сокращенную преамбулу, как показано на рис. 7.

На ранних этапах реализации механизма вытеснения, вероятно, право передавать запросы на вытеснение будет дано только станциям, участвующим в вытесняемой передаче в качестве отправителя или получателя [44], [3, doc.: 24/0389r0]. Разрешение другим станциям передавать свои запросы на вытеснение во время пауз может привести к соревнованию между ними и потере запросов. Также возможен вариант, когда точка доступа, участвующая в передаче несрочных данных, время от времени отправляет триггер-кадр (англ.: Trigger Frame, TF), в котором выделенные ресурсные блоки (англ.: Resource Unit, RU) со случайным доступом предоставляются станциям, чтобы они могли сообщить о наличии высокоприоритетного трафика, требующего низкой задержки [3, doc.: 24/0442r3].

В схемах, когда несколько станций могут отправлять запросы на вытеснение, станция, участвующая в текущей передаче кадров, может быть приоритизирована, если ей будет разрешено передавать запрос сразу после приема очередного кадра [3, doc.: 24/0416r1]. Кроме того, такой запрос может быть добавлен в кадр подтверждения.

Чтобы убедиться, что трафик станции, выигравшей соревнование за канал, обслуживается справедливо, вытеснение может быть включено только в том случае, если эта станция явно разрешила отправку запросов на вытеснение [3, doc.: 24/0131r0].

Подводя итог, можно сказать, что механизмы вытеснения потенциально сильно снижают задержку доставки данных [58]. Например, результаты моделирования [3, doc.: 22/1880r1] показывают, что вытеснение снижает задержку на 60–80% для различных категорий доступа, включая 90-й перцентиль, то есть демонстрирует выигрыш в худших ситуациях. Однако реализация вытеснения значительно усложняет задачу и оставляет много нерешенных проблем. Однако рабочая подгруппа TGBn делает первые шаги в этом направлении, внедряя несколько механизмов индикации малой задержки (см. п. 6.1 и [3, doc.: 24/1195r1, 23/0045r1, 24/0264r1]), в то время как вытеснение становится перспективным кандидатом для их использования в будущих стандартах Wi-Fi.

Усовершенствования одноранговой связи. Одной из целей 802.11bn является снижение задержки в сценариях одноранговой (P2P) связи между клиентскими станциями [44], например, когда компьютер передает видеопоток на гарнитуру расширенной реальности. Эта связь может осуществляться в основном канале, т.е. канале, используемом клиентскими станциями для связи с точкой доступа, а также в другом канале, не пересекающимся с основным.

Работа P2P в основном канале может быть улучшена путем расширения механизма совместного использования TXOP по триггеру (TXS), представленного в стандарте 802.11be. В 802.11be точка доступа может поделиться своим TXOP с одной станцией, которая может использовать его для отправки своих данных другой станции [34]. Отметим, что при таком совместном использовании TXOP точка доступа позволяет отправлять кадры только определенной станции. Чтобы обеспечить двунаправленный обмен данными между двумя станциями, точка доступа должна послать TF для совместного использования своего TXOP сначала одной станции, затем другой и т.д. Однако в некоторых сценариях две или более клиентских станции должны иметь возможность быстро обмениваться данными. Чтобы избежать повторных перераспределений TXOP и вызванных этим накладных расходов, 802.11bn вводит возможность выделения TXOP группе станций, что, как ожидается, сократит задержки доставки [3, doc.: 23/1929r0, 24/0392r1]. Такое распределение обеспечит двунаправленную связь и позволит P2P-устройствам использовать приоритетные параметры доступа к каналу во время выделенного TXOP [3, doc.: 24/0403r2].

Для облегчения P2P-связи вне основного канала предлагается [3, doc.: 24/0393r3], чтобы точка доступа рассылала в своей сети набор каналов, рекомендованных для P2P-связи, включая соответствующую информацию в свои биконы. Точка доступа также может рассылать информацию о временных интервалах для P2P-передач, которые могут совпадать с расписанием энергосбережения (англ.: Power Save, PS) точки доступа [3, doc.: 22/1528r1] (см. п. 6.4).

Однако в сценариях высокоплотных сетей в канале для P2P-связи все еще могут быть помехи от перекрывающихся сетей, поскольку различные сети могут иметь несовпадающие P2P-расписания [3, doc.: 23/0294r1]. Для решения этой проблемы TGbn разрабатывает механизм совместных рекомендаций каналов (англ.: Coordinated Channel Recommendation, Co-CR), который позволит точкам доступа из разных сетей рассылать информацию о каналах без помех для P2P-связи.

Таким образом, P2P-станции смогут общаться в согласованных каналах в запланированное время даже в условиях большого количества пересекающихся сетей [3, doc.: 23/1424r0]. Такой механизм является примером того, как координация нескольких точек доступа (Multi-AP) улучшает производительность Wi-Fi. В § 7 описаны другие схемы Multi-AP, рассматриваемые для 802.11bn.

Улучшение служебной информации о требуемом качестве обслуживания. Разработчики 802.11bn также обратили внимание на недостатки существующих методов оповещения устройств сети о требуемом качестве обслуживания. В частности, точка доступа может получать от станций отчеты о состоянии буфера, т.е. размеры очередей, относящиеся к определенным идентификаторам трафика. Текущее устройство с поддержкой 802.11be способно указать размер очереди до ~ 2 МБ, что, однако, не соответствует ни пиковой скорости передачи данных 802.11be, ни максимальному размеру кадра 802.11be, который составляет ~ 15 МБ [3, doc.: 24/0963r3]. Этот недостаток заставляет слишком часто выполнять опрос, что увеличивает накладные расходы и ограничивает производительность Wi-Fi как с точки зрения пропускной способности, так и задержки. Для решения этой проблемы TGbn увеличивает указываемый размер очереди в отчетах о состоянии буфера [44].

Помимо этого, несколько потоков трафика с различными требованиями к задержке могут принадлежать одной категории доступа EDCA и находиться в одной

очереди. В результате для срочного кадра может возникнуть проблема блокировки головным кадром очереди, который может быть менее приоритетным [3, doc.: 24/0463r2]. Эта проблема может быть решена с помощью механизмов спецификации трафика (англ.: Traffic Specification, TSPEC) и классификации трафика (англ.: Traffic Classification, TCLASS) из 802.11e, а также с помощью службы классификации потоков (англ.: Stream Classification Service, SCS) с использованием обновленных в 802.11be параметров качества обслуживания. Эти механизмы в совокупности позволяют определять границы задержки, минимальную скорость передачи данных и т.д. для каждого идентификатора трафика, что позволяет принимать гибкие решения по планированию. Однако в настоящее время только максимум два идентификатора трафика могут быть сопоставлены с категорией с наивысшим приоритетом. Стандарт 802.11bn собирается исправить эту проблему и разрешить перераспределение неиспользуемых идентификаторов трафика низкоприоритетных категорий [44].

Далее, 802.11bn делает первые шаги в сторону расширенной поддержки архитектуры низких задержек, малых потерь и масштабируемой пропускной способности (англ.: Low Latency, Low Loss, and Scalable Throughput, L4S) [59]. L4S использует явное уведомление о перегрузке (англ.: Explicit Congestion Notification, ECN) в заголовке IP для улучшения управления очередью, тем самым снижая задержки в очереди и потери пакетов из-за перегрузки. Точки доступа UHR будут опционально поддерживать индикацию L4S ECN, поэтому при возникновении перегрузки на уровне управления доступом к среде из-за скопления пакетов в очереди передачи они смогут уведомить верхние уровни и обеспечить необходимую адаптацию.

Еще одной проблемой является отсутствие индикации наличия случайного срочного трафика в Wi-Fi [3, doc.: 24/1195r1]. Для ее решения разработчики 802.11bn рассматривают создание механизма, который поможет станции, принимающей данные, указать на наличие трафика с низкой задержкой [44]. Общая идея заключается в явном указании наличия данных и требуемой задержки станцией, принимающей данные в течение ТХОР [3, doc.: 24/1195r1]. Если эта задержка меньше, чем оставшееся время ТХОР, то текущий отправитель может передать право передачи, чтобы выполнить требования к качеству обслуживания. Авторы [3, doc.: 23/0045r1, 24/0264r1] предлагают использовать BSR (англ.: Buffer Status Report, BSR), специально разработанный для трафика, чувствительного к задержке. Аналогичным образом авторы [3, doc.: 23/0740r0] предлагают включить в отчет о состоянии буфера информацию о наличии срочных пакетов, время жизни которых вот-вот истечет. Ожидается, что эти модификации помогут сократить задержки при доставке за счет использования инструментов доступа к каналу с низкой задержкой, в том числе и будущих поколений, например, вытеснения, описанного в п. 6.1.

6.2. Динамическое управление шириной канала

Динамическая работа с поддиапазонами. Разработчики 802.11bn подчеркивают несоответствие возможных рабочих полос точек доступа и клиентских станций [3, doc.: 23/2141r3, 24/1863r1]. Ожидается, что современные точки доступа будут поддерживать каналы шириной до 320 МГц, в то время как клиентские станции часто ограничены гораздо меньшей шириной. Поскольку рабочая полоса станции должна включать основной канал, такое несоответствие между точкой доступа и связанными с ней станциями приводит к тому, что большая часть ширины канала остается неиспользованной.

Для решения этой проблемы рабочая группа TGbn предлагает механизм динамической работы с поддиапазонами (англ.: Dynamic Subband Operation, DSO) [44]. С помощью данного механизма точка доступа может по предварительной договоренности динамически (т.е. для каждой передачи) выделять частотные ресурсы для станций за пределами их текущей рабочей полосы. Эта часть рабочей полосы, на-

званная поддиапазоном DSO, исключает основной канал сети, но присутствует в рабочей полосе точки доступа. Точка доступа инициирует обмен кадрами DSO в основном канале со специальным начальным управляющим кадром DSO (DSO ICF), в конце которого помещается фиктивная информация, чтобы дать станции достаточное время для переключения в другой поддиапазон (на другой канал). Когда станция получает DSO ICF с назначенным ресурсным блоком в поддиапазоне DSO, эта станция переходит в указанный поддиапазон DSO и затем передает начальный управляющий ответный кадр (ICR) в указанном ресурсном блоке. Затем следует обычный обмен кадрами с использованием ресурсных блоков поддиапазона DSO. По окончании обмена кадрами станция переключается обратно на поддиапазон с основным каналом. Оценки производительности показывают, что DSO может увеличить пропускную способность в 1,5–3 раза в сценариях с высокой плотностью [3, doc.: 24/1863r1].

Отметим, что DSO концептуально похож на доступ к неосновному каналу NPCA (см. п. 6.1), но переходы каналов DSO полностью организуются точкой доступа и явно начинаются в основном канале.

Динамическое расширение рабочей полосы. Еще одной проблемой, решаемой рабочей группой TGbn, является общее недостаточное использование широких рабочих полос, таких как каналы 160 МГц и 320 МГц. Корпоративные и общественные сети часто не могут использовать широкие каналы и консервативно ограничиваются 40 МГц [3, doc.: 24/0088r1, 24/0815r1]. В то же время в этих сценариях могут использоваться более широкие каналы при контролируемых обстоятельствах, например, при координации между соседними точками доступа (см. § 7). Однако устаревшие механизмы переключения каналов приводят к длительным задержкам переключения и прерыванию соединения [3, doc.: 24/0088r1].

Для решения этой проблемы в 802.11bn определен механизм динамического увеличения рабочей полосы (англ.: Dynamic Bandwidth Expansion, DBE), который позволяет точке доступа динамически изменять свою рабочую полосу в сети [44]. Такое изменение полосы объявляется заранее (например, за несколько интервалов рассылки биконов – специальных служебных кадров) и выполняется с помощью сигнала в основном канале. Тем самым сокращаются задержки переключения рабочей полосы и сохраняется обратная совместимость с устаревшими станциями.

6.3. Уведомление о недоступности. Чтобы уменьшить размеры и стоимость мобильных устройств, производители часто заставляют станции Wi-Fi использовать радиокomпоненты совместно с другими технологиями, например, Bluetooth, что вызывает проблемы сосуществования устройств (англ.: In-Device Coexistence, IDC) [3, doc.: 23/2078r5]. Действительно, когда ведется передача с помощью одной технологии, прием с помощью другой невозможен. Для решения этой проблемы 802.11bn вводит механизмы сообщения о недоступности, которые позволяют станции информировать другие станции о ее предстоящем времени неактивности (см. [44] и [3, doc.: 23/1964r1]). Примечательно, что традиционные методы оповещения о режимах энергосбережения (англ.: Power Save, PS) могут быть недостаточны для оповещения о следующем интервале недоступности до его наступления [3, doc.: 23/2078r5].

Благодаря сообщениям о недоступности станции помогают точке доступа избежать планирования и передачи кадров в эти интервалы [3, doc.: 24/0856r0], обеспечивая лучшее использование ресурсов, минимизацию помех и экономию энергии.

Для снижения накладных расходов в случае предсказуемых и периодических интервалов недоступности (например, когда передаются кадры Bluetooth с аудиоданными), 802.11bn определяет режим периодической недоступности (англ.: Periodic Unavailability Operation, PUO) [44], [3, doc.: 24/0675r1]. Сообщение о PUO, вероят-

но, будет реализовано через модифицированную версию механизма назначенного момента пробуждения (англ.: Target Wake Time, TWT) с новыми полями [44].

Аналогично, для уведомления о внезапных или срочных событиях недоступности 802.11bn вводит режим динамической недоступности (англ.: Dynamic Unavailability Operation, DUO) [44]. В этом режиме станция указывает время начала и продолжительность недоступности в начале возможности передачи или во время нее в модифицированных кадрах, таких как отчет о состоянии буфера или кадры группового подтверждения для нескольких станций [3, doc.: 23/1964r1, 24/1558r2].

Недоступность устройства может быть полная или частичная. При частичной недоступности возможен обмен кадрами при более низких сигнально-кодовых конструкциях, меньшем количестве пространственных потоков, более узкой полосе и т.д. [3, doc.: 24/0675r1, 24/1109r1]. 802.11bn может также включить механизм оповещения о недоступности в различных каналах для многоканального устройства [3, doc.: 24/0420r2].

Рабочая подгруппа TGbn расширяет этот механизм и на точки доступа, что очень важно для мобильных точек доступа и инфраструктурных точек доступа с несколькими технологиями подключения [3, doc.: 24/1108r2], например, для смартфона, передающего музыку по Bluetooth и развернувшего точку доступа Wi-Fi.

Механизм PUO также полезен для организации энергосбережения точки доступа [3, doc.: 24/2040r9], поскольку позволяет информировать связанные станции о том, когда она будет недоступна, и отключать свои радиомодули в указанные промежутки времени.

6.4. Энергосбережение. Потребление энергии всегда было важной проблемой для Wi-Fi, в основном потому, что большинство устройств мобильны и питаются от батарей. В то же время появляются регуляторные нормы, требующие очень низкого энергопотребления как от станций, так и от точек доступа [3, doc.: 22/1790r0]. Таким образом, 802.11bn нацелен на обеспечение механизмов энергосбережения как для точек доступа, так и для клиентских станций.

Динамическое энергосбережение. Модуль Wi-Fi потребляет 3–10% энергии смартфона [3, doc.: 22/1841r0], из которых более половины используется для прослушивания радиоэфира [3, doc.: 22/1414r1]. В стандарте 802.11 был представлен ряд механизмов энергосбережения, таких как базовый режим энергосбережения, автоматическая доставка при энергосбережении или механизм TWT [60, 61], которые предполагают полное отключение радиоинтерфейса. Однако такие подходы увеличивают максимальную задержку вплоть до длительности отключения, и поэтому не могут использоваться в сценариях, когда задержки критичны, что и является актуальным в контексте стандарта 802.11bn.

Чтобы избежать длительных периодов недоступности и в то же время снизить энергопотребление, в 802.11bn планируется определить динамический режим энергосбережения, который позволит станции переключаться между:

- режимом низких возможностей, когда станция может принимать только простые кадры физического уровня, например, в канале 20 МГц с одним пространственным потоком и медленной сигнально-кодовой конструкцией, и
- режимом высоких возможностей, когда станция может обрабатывать кадры физического уровня на высокой скорости с большим числом пространственных потоков [3, doc.: 23/1875r1, 23/1965r2, 23/2003r1].

Переход из режима с низкими возможностями в режим с высокими возможностями инициируется триггер-кадром, который может предоставить более точную информацию об ожидаемой передаче, например, о количестве пространственных потоков, рабочей полосе частот и сигнально-кодовой конструкции. Такой режим энергосбережения похож на режим пространственного мультиплексирования при энергосбере-

жении [3, doc.: 22/1423r2], предложенный для 802.11be, но последний требует от станции прослушивания канала со всей его рабочей полосой [3, doc.: 23/2003r1, 23/1875r1].

Станции требуется время для переключения из режима низких возможностей в режим высоких возможностей. Чтобы убедиться, что станция готова к приему кадра физического уровня сразу после окончания триггер-кадра, 802.11bn предлагает включать в триггер-кадр последовательность промежуточных проверок корректности кадра (англ.: Intermediate Frame Check Sequence, IFCS) [3, doc.: 24/1246r0], за которой следуют данные или сигналы для других станций, не являющихся точками доступа, и дополнительные поля (англ.: padding), которые продлевают кадр на необходимую длительность [3, doc.: 23/1873r1, 24/0450r3, 24/1261r0]. Станция может начать переключение в режим высоких возможностей после успешно декодирования IFCS, в то время как другие станции ждут окончания триггер-кадра, чтобы затем получить свои данные. Если триггер-кадр предназначен для нескольких станций, которые имеют различные требования к времени переключения, в нем может быть несколько IFCS [3, doc.: 24/1256r0].

Энергосбережение с межканальным взаимодействием. Важно отметить, что рабочая группа TGbn планирует усовершенствовать структуру многоканальной работы, обеспечив возможность энергосбережения для межканальных взаимодействий, устраняя неэффективность текущего управления каждым каналом в отдельности [20, 44]. В 802.11be, когда клиентское многоканальное устройство хочет перейти в режим энергосбережения во всех каналах, оно должно выполнять отдельные обмены кадрами в каждом из них, что является энергозатратным и ресурсоемким [3, doc.: 24/0602r0]. Для решения этой проблемы в стандарте 802.11bn введена сигнализация энергосбережения между каналами, которая позволяет многоканальным устройствам координировать режимы энергосбережения на нескольких каналах через один активный канал. Например, многоканальная точка доступа и клиентское устройство могут поддерживать связь по одному каналу, не включая другие радиointерфейсы, активируя их только после получения кадра пробуждения на основном интерфейсе. Такой подход обеспечивает большую гибкость в поиске компромисса между энергопотреблением и производительностью для многоканальных устройств.

Энергосбережение точек доступа. Предыдущие стандарты 802.11 не уделяли особого внимания энергосбережению точек доступа, однако в настоящее время, с плотным развертыванием сетей Wi-Fi и увеличением возможностей устройств Wi-Fi, потребление энергии точкой доступа становится проблемой [20]. Сейчас энергопотребление точки доступа может быть снижено за счет сужения рабочей полосы, отключения дополнительных каналов многоканального устройства точки доступа, уменьшения числа пространственных потоков, использования менее энергоемких сигнально-кодовых конструкций [3, doc.: 23/0010r0, 23/2040r1]. Однако такие изменения конфигурации имеют длительность перехода в несколько бикон-интервалов, поэтому их использование приводит к длительным периодам снижения производительности сети с точки зрения пропускной способности и задержки.

Учитывая указанное ограничение, 802.11bn определяет новые механизмы динамического энергосбережения точки доступа и запланированного энергосбережения точки доступа [3, doc.: 24/0833r0, 23/2040r1].

Первый из них аналогичен описанному выше режиму динамического энергосбережения для станций, не являющихся точками доступа [3, doc.: 24/0659r1]. Во втором, аналогично запланированному энергосбережению точки доступа в 802.11ah [26, 28], точка доступа объявляет в биконах, что в течение некоторого временного окна она перейдет в определенное состояние. Состояния могут включать [3, doc.: 24/0097r0]:

- состояние сна, когда точка доступа недоступна,
- состояние прослушивания, когда точка доступа может принимать кадры, но откладывает ответы на них,
- состояние пониженных возможностей, например, когда точка доступа использует одну антенну, узкий канал или сигнально-кодовые конструкции с низкой модуляцией,
- активное состояние, когда точка доступа может принимать и передавать данные без ограничений.

Клиентские станции, которые получают расписание, могут выключить свои радиointерфейсы, когда точка доступа находится в состоянии сна или прослушивания. На стороне точки доступа это может быть реализовано с помощью механизма группового TWT с определенной индикацией [44]. В частности, точка доступа может запланировать переключение между состояниями сна и активным состоянием с помощью механизма PUO (см. п. 6.3). Оно также может сопровождаться отправкой служебной информации в другом канале [3, doc.: 24/1166r0], т.е. переключиться в состояние бодрствования на одном канале путем подачи сигнала на другом канале.

6.5. Открытые вопросы. Описанные усовершенствования подуровня управления доступом к среде открывают новые возможности, но также выявляют ряд проблем, требующих дальнейших исследований. Для успешной практической реализации этих механизмов в реальных устройствах необходимо решить следующие ключевые задачи.

Модификации доступа к каналу, обеспечивающие низкую задержку, в частности P-EDCA, порождают несколько серьезных проблем. Эффективность P-EDCA в сложных сценариях со скрытыми станциями и множественными перекрывающимися сетями требует тщательного изучения. Критическим условием для эффективной работы является глобальное обнаружение кадров DS-CTS всеми станциями в зоне покрытия. Нарушение этого условия, вызванное, например, скрытыми узлами, приводит к коллизиям и сводит к нулю преимущество механизма.

Особую сложность представляют гетерогенные сценарии, где соседние сети используют различные политики доступа к каналу. При совпадении параметров EDCA в соседних сетях использование P-EDCA в одной из них может существенно ухудшить распределение задержек в другой сети, не применяющей этот механизм. Более того, если обе сети пытаются обеспечить низкую задержку различными методами (например, P-EDCA и более агрессивными значениями параметров EDCA), результирующая производительность становится слабо предсказуемой.

Оптимизация параметров P-EDCA, таких как порог неудачных попыток передачи для активации механизма, требует дополнительных исследований. Серьезной проблемой остается потенциальная несправедливость распределения ресурсов: станции, интенсивно использующие P-EDCA, могут монополизировать среду в ущерб другим устройствам.

Механизмы динамического управления шириной и конфигурацией используемого канала (NPCA, DSO, DBE), несмотря на очевидные преимущества, демонстрируют ограниченную эффективность в неидеальных условиях. Фундаментальной проблемой остается несоответствие в оценке занятости канала различными устройствами, особенно в средах с несколькими близкорасположенными сетями. Асимметричное восприятие передач третьих станций ограничивает применимость NPCA в реальных сценариях [3, doc.: 24/0829r0, 24/0670r2].

Конфликт с существующей логикой доступа к каналу, такой как возможность досрочного освобождения канала, создает дополнительные сложности для работы вне основного подканала. Существенными факторами, снижающими эффективность, являются значительные накладные расходы на синхронизацию переключения ка-

налов и задержки самого процесса переключения [3, doc.: 23/0797r1, 23/0962r0]. Повышенное энергопотребление при частой смене каналов делает проблему энергоэффективности ключевой для практического внедрения [3, doc.: 24/1260r2].

Для полноценной реализации этих механизмов необходимы усовершенствованные алгоритмы измерения канала и планирования ресурсов, способные адаптивно управлять используемой шириной канала в динамически изменяющихся условиях.

При использовании механизма вытеснения возникает комплекс нерешенных проблем, включая координацию между устройствами, необходимость в новых методах подтверждения прерванной передачи, обеспечение работы в сценариях с несколькими сетями и защиту от скрытых станций [3, doc.: 23/1242r1, 24/0636r1, 24/1074r0]. Сложность согласования форматов управляющих кадров и протоколов взаимодействия привела к отсрочке внедрения этого механизма до будущих поколений Wi-Fi. Для ускорения внедрения механизма в стандарт требуется дополнительная работа по количественной оценке выигрыша в задержке в разнообразных сценариях развертывания.

Усовершенствования одноранговой связи, хотя и перспективны для приложений XR, порождают новые вызовы. Для организации эффективного группового распределения ТХОР точке доступа нужны методы сбора и актуализации информации о канале и трафике между станциями. Планирование ресурсов усложняется с ростом числа групп и необходимостью координации между точками доступа из различных сетей при организации одноранговой связи вне используемого канала.

Проблема планирования усугубляется в условиях частой недоступности станций, принимающих трафик с низкой задержкой. Точка доступа должна управлять расписанием с учетом заявленной недоступности, однако расхождения между декларируемой и фактической продолжительностью недоступности существенно осложняют эту задачу [3, doc.: 24/1848r1]. Станции, теряющие синхронизацию во время длительных периодов недоступности, требуют разработки надежных механизмов восстановления синхронизации состояния канала.

Новые механизмы энергосбережения поднимают вопросы обратной совместимости, оптимального сочетания с традиционными методами [3, doc.: 24/0813r0], и взаимного влияния энергосберегающей точки доступа и связанных станций на их производительность. Критической проблемой является ограничение доступности сети при переходе точки доступа в состояния сна или прослушивания, что может препятствовать выполнению строгих требований к качеству обслуживания во время смены точки доступа.

§ 7. Нововведения для координации сетей Wi-Fi

Ключевым направлением развития стандарта 802.11bn является обеспечение стабильной работы в условиях плотного развертывания сетей Wi-Fi. Предпочтительный подход для достижения этой цели заключается в организации координации между отдельными сетями Wi-Fi (точками доступа, выступающими в роли координаторов для своих сетей). Для реализации данной концепции разработчики 802.11bn сосредоточили усилия на двух основных направлениях: обеспечении бесшовного роуминга для мобильных устройств, перемещающихся между точками доступа (см. п. 7.1), и разработке механизмов координации множества точек доступа (англ.: Multi-Access Point, Multi-AP), позволяющих точкам доступа оптимально распределять радиоресурсы между собой (см. пп. 7.2–7.9).

7.1. Бесшовный роуминг. Существующие сети Wi-Fi сталкиваются с проблемами обеспечения низкой задержки и высокой надежности при перемещении устройств между точками доступа. Несмотря на внесенные улучшения в механизмы, связанные

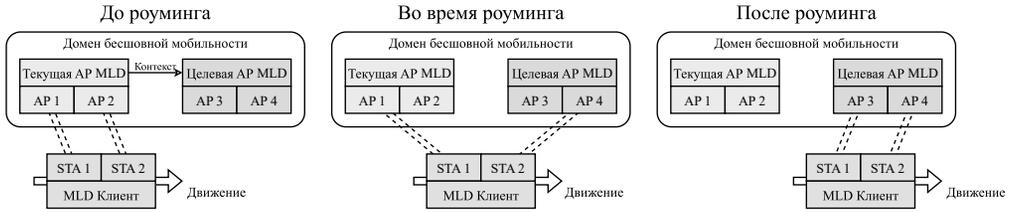


Рис. 8. Пример процедуры роуминга в домене беспроводной мобильности [62]

с роумингом (стандарты 802.11k, 802.11v, 802.11w и 802.11r), смена точки доступа не гарантирует строгого соблюдения временных ограничений. При переходе между сетями станции требуется повторное установление защищенного соединения и восстановление контекста [3, doc.: 24/1851r2], включающего состояние согласованных параметров, порядковые номера передаваемых кадров, расписание назначенных моментов пробуждения и другие служебные данные. В некоторых случаях, например, при переходе из режима энергосбережения, может потребоваться дополнительный обмен кадрами длительностью до 70 мс [3, doc.: 22/1874r2, 24/0679r4], что неприемлемо для приложений, критичных к задержкам. Эти ограничения делают совершенствование механизмов роуминга одним из приоритетных направлений развития Wi-Fi 8.

В рамках этого направления основная задача 802.11bn – минимизировать время переключения между точками доступа, что требует разработки новых механизмов управления мобильностью. Ключевым нововведением здесь становится домен беспроводной мобильности (англ.: Seamless Mobility Domain, SMD), объединяющий в себя несколько, возможно географически распределенных, многоканальных точек доступа [44]. Клиентское многоканальное устройство, прошедшее аутентификацию в SMD, может свободно переключаться между точками доступа в пределах этого домена (рис. 8).

Беспшовность роуминга обеспечивается за счет исключения необходимости полной переассоциации и повторной аутентификации, а также передачи части контекста соединения между точками доступа SMD через проводную сеть. Теоретически возможна даже пересылка между точками доступа пакетов данных, не доставленных до начала роуминга. Такое взаимодействие между точками доступа (фактически, между разными сетями) существенно сокращает или полностью устраняет задержки перед возобновлением обмена данными между клиентской станцией и целевой точкой доступа после переключения.

Важно отметить, что концепция SMD допускает поэтапный переход от текущей точки доступа к целевой [3, doc.: 23/1908r2], [44]. Клиентское многоканальное устройство может последовательно переключать соединения в разных частотных каналах, создавая промежуточную стадию роуминга, когда клиент одновременно подключен к двум точкам доступа в разных каналах, как показано на рис. 8. Это позволяет сохранять непрерывное подключение к SMD, обеспечивая высокую надежность и низкую задержку передачи данных в процессе роуминга.

7.2. Концепция Multi-AP. Ключевой особенностью Wi-Fi 8 является поддержка координации множества точек доступа (Multi-AP). Ожидается, что этот механизм позволит одновременно достичь нескольких целей: повышения пропускной способности, снижения задержек и увеличения надежности сетей Wi-Fi.

Сеть Multi-AP обычно включает координирующую точку доступа (англ.: sharing AP), координируемые точки доступа (англ.: shared AP) и клиентские станции. Координирующая точка доступа собирает информацию от координируемых точек до-

Таблица 4

Схемы координации множества точек доступа (Multi-AP)

Аббревиатура	Название схемы	Краткое описание	D0.3
Co-CR	Coordinated Channel Recommendation	Точки доступа координируют работу, совместно определяя и рассылая информацию об оптимальных каналах для одноранговой связи (P2P) между своими станциями	✓
Co-RTWT	Coordinated Restricted Target Wake Time	Совместное планирование защищенных интервалов пробуждения: точки доступа координируют расписания R-TWT для минимизации взаимных помех	✓
Co-TDMA	Coordinated Time Division Multiple Access	Совместный множественный доступ с разделением по времени: точки доступа синхронизируют передачи для эффективного использования временных ресурсов	✓
Co-OFDMA	Coordinated Orthogonal Frequency-division Multiple Access	Совместный множественный доступ с ортогональным частотным разделением: координация использования ресурсных блоков между точками доступа	✗
Co-SR	Coordinated Spatial Reuse	Совместное пространственное повторное использование радиоресурсов: адаптивное управление мощностью передачи для минимизации помех между соседними сетями	✓
Co-BF	Coordinated Beamforming	Совместное формирование диаграммы направленности: координация прекодеров и антенных лучей для максимизации полезного сигнала и минимизации интерференции	✓
J-TX	Joint Transmission	Совместная передача: скоординированная многопользовательская MIMO-передача от множества точек доступа к множеству станций	✗

Примечание: ✓ – механизм вошел в стандарт, а ✗ – не вошел.

ступа и на основе этих данных принимает решения о распределении канальных ресурсов. Все точки доступа в такой архитектуре могут взаимодействовать через проводную или беспроводную сеть [3, doc.: 22/1394r1], а также формировать единый домен бесшовной мобильности (см. п. 7.1).

Перед выполнением согласованной передачи координирующая точка доступа собирает информацию о состоянии подчиненных точек доступа (их возможности, параметры канала, состояние буферов), выбирает передающие точки доступа на основе этих данных и определяет наиболее подходящий режим передачи в соответствии с целевыми метриками производительности (пропускная способность, задержка, надежность). Затем координирующая точка доступа получает доступ к каналу, приобретает ТХОР и инициирует согласованную передачу. В частности, координирующая точка доступа отправляет триггерный кадр для синхронизации всех координируемых точек доступа и определяет параметры последующей согласованной передачи.

Альтернативный подход предполагает, что параметры согласованной передачи согласуются заранее и действуют в течение одного или нескольких сервисных периодов (англ.: Service Period, SP). Такой долгосрочный подход снижает накладные расходы на служебный трафик, но обеспечивает меньшую гибкость и медленнее реагирует на динамические изменения в сети.

Разработчики стандарта 802.11bn рассматривают различные схемы координации Multi-AP, которые перечислены в табл. 4 в порядке возрастания потенциального выигрыша от использования и сложности реализации. Хотя в текущую версию стандарта [44] включены только пять схем, далее рассматриваются все перспективные предложения.

7.3. Согласованная рекомендация канала. Как описано в п. 6.1, точка доступа может рекомендовать временные интервалы и каналы вне основного частотного диапазона для организации одноранговых соединений (P2P) [3, doc.: 24/0393r3] между

клиентскими станциями. Для согласования передач между станциями различных сетей предлагается схема согласованных рекомендаций каналов (англ.: Coordinated Channel Recommendation, Co-CR). Посредством Co-CR различные точки доступа могут рекомендовать одинаковые каналы [3, doc.: 23/1424r0], что позволяет станциям из разных сетей напрямую взаимодействовать друг с другом.

7.4. Согласованный R-TWT. Схема согласованного R-TWT (англ.: Coordinated R-TWT, Co-RTWT) позволяет точке доступа распространять информацию о своих расписаниях защищенных назначенных моментов пробуждения (R-TWT), обеспечивая их защиту от передач в соседних сетях. Точка доступа сообщает информацию о своих R-TWT другим точкам доступа, которые, в свою очередь, ограничивают передачи своих станций для предотвращения межсетевых помех и коллизий. Точки доступа могут согласовывать свои R-TWT таким образом, чтобы передачи в них не накладывались друг на друга [3, doc.: 23/2022r1, 24/0388r0]. Этот подход позволяет устранить проблему нарушения расписания R-TWT из-за интерференции от соседних сетей, что особенно важно для повышения надежности и сокращения задержек передачи данных.

7.5. Согласованный TDMA. Согласованный множественный доступ с разделением по времени (англ.: Coordinated TDMA, Co-TDMA) представляет собой простую схему координации, в которой точки доступа планируют интервалы своих передач для исключения их пересечения во времени [14]. Процесс координации состоит из трех фаз, показанных на рис. 9: опрос, выделение TXOP и возврат TXOP.

На фазе опроса координирующая точка доступа отправляет начальный управляющий кадр (ICF) соседним точкам доступа для запроса информации. Получаемые ответы содержат сведения о возможностях координации, запрашиваемой длительности TXOP, требуемой пропускной способности и характеристиках трафика [3, doc.: 23/0249r1, 24/0842r0]. На фазе выделения TXOP координирующая точка доступа назначает выбранной координируемой точке доступа временной интервал внутри TXOP, о чем уведомляет с помощью триггер-кадра MU-RTS. Координируемая точка доступа подтверждает получение кадром CTS и инициирует передачу данных в своей сети. На заключительной фазе, при исчерпании выделенного времени или завершения передачи трафика, координируемая точка доступа возвращает право использования TXOP координирующей точке доступа.

Один и тот же TXOP может быть последовательно использован несколькими точками доступа [3, doc.: 23/0249r1]. Важно отметить, что в Co-TDMA возможна координация между точками доступа с различными основными подканалами при условии, что они находятся в пределах общей рабочей полосы частот и отсутствуют взаимные помехи [3, doc.: 23/0249r1].

Схема Co-TDMA использует механизм виртуальной занятости среды (NAV) для обеспечения эксклюзивного доступа к каналу только одной целевой сети. Однако установленный NAV в одной сети может непреднамеренно блокировать передачи в другой сети в течение выделенного периода. Для решения этой проблемы предложена концепция разделения TXOP на номинальный (для координированного планирования) и базовый (для обратной совместимости) [3, doc.: 23/1910r1]. Для защиты от интерференции со стороны скрытых станций предлагаются дополнительные механизмы, включая специализированные кадры завершения TXOP [3, doc.: 24/0382r0] и процедуры подтверждения доступа [3, doc.: 24/0423r0, 24/1701r2].

7.6. Согласованный OFDMA. Схема согласованного OFDMA (англ.: Coordinated OFDMA, Co-OFDMA) предусматривает координацию как временных, так и частотных ресурсов. Координирующая точка доступа получает доступ к широкому каналу и выделяет его часть координируемой точке доступа на определенный временной

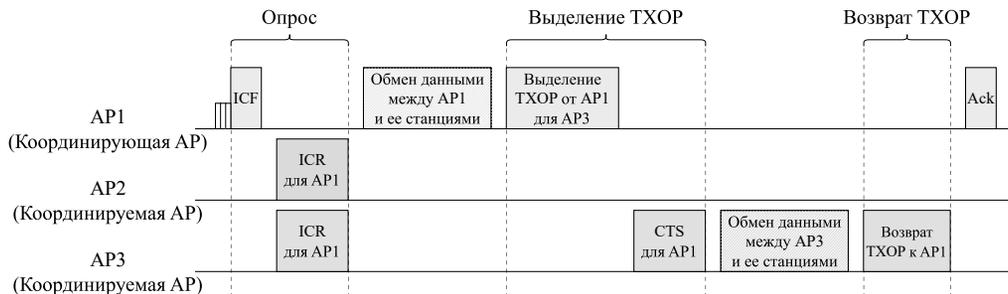


Рис. 9. Пример процедуры Co-TDMA между тремя точками доступа [44]

интервал. Co-OFDMA функционирует аналогично классическому OFDMA, но реализуется между соседними точками доступа.

Co-OFDMA активно исследуется в научной литературе [63–65]. В работе [63] предложена простая схема передачи на основе Co-OFDMA, где координирующая точка доступа с помощью триггерного кадра приглашает соседнюю точку доступа к совместной передаче в текущем TXOP. Критическим требованием является наличие у точек доступа различных первичных каналов, которые сохраняются за ними при планировании в Co-OFDMA.

Также в литературе получены различные результаты относительно эффективности Co-OFDMA. Авторы [63] разработали математическую модель для сценария с двумя сетями в общей полосе 40 МГц с разными первичными каналами, показав увеличение пропускной способности системы на 50%. Однако эксперименты разработчиков 802.11bn в более реалистичных условиях выявили умеренный прирост общей пропускной способности (<10%) при значительном снижении количества коллизий и возможности использования более скоростных сигнально-кодовых конструкций [3, doc.: 22/1567r0]. В исследовании [64] подчеркивается важность точной информации о состоянии канала (CSI): измерения с периодом меньше времени когерентности канала обеспечивают близкую к оптимальной долю ошибок, тогда как увеличение интервала измерений приводит к существенному ухудшению производительности.

Следует отметить, что многие исследователи предполагают возможность разделения канала на блоки по 20 МГц, однако стандарт 802.11 передает идентичную информацию в преамбуле в частотных блоках по 80 МГц, что задает гранулярность разделения в широкополосных передачах. Использование блоков меньшего размера повышает гибкость планирования, но требует разработки новых форматов кадров, что усложняет спецификацию [3, doc.: 23/0768r0]. В результате Co-TDMA рассматривается как более простая и функционально достаточная альтернатива Co-OFDMA, что обусловило исключение последней из стандарта 802.11bn.

7.7. Согласованное пространственное повторное использование радиоресурсов.

Схема согласованного пространственного повторного использования радиоресурсов (англ.: Coordinated Spatial Reuse, Co-SR) развивает аналогичный механизм из стандарта 802.11ax. Основная задача этой схемы – снижение интерференции от соседних беспроводных сетей за счет согласованного управления мощностью передачи.

Для Co-SR рассматриваются два типа координации [3, doc.: 24/0640r0]. При односторонней координации координирующая точка доступа выбирает мощность передачи, достаточную для достижения целевого отношения сигнала к шуму и интерференции (SINR) на станции, и указывает координируемой точке доступа максимально допустимый уровень мощности в текущем интервале передачи. При двусторонней

координации координирующая точка доступа оптимизирует общую производительность системы, определяя мощности передачи для всех точек доступа с учетом характеристик каналов и целевых показателей SINR. Для этого точки доступа собирают данные измерений состояния канала от своих станций, включая информацию о мощности биконов из соседних сетей, и обмениваются этой информацией.

Примечательно, что, как показано в [3, doc.: 24/0640r0], разница в производительности между односторонней и двусторонней координацией незначительна.

Результаты моделирования демонстрируют, что по сравнению с EDCA и методами из стандарта 802.11ax [15], [3, doc.: 22/1970r0], Co-SR обеспечивает стабильное повышение пропускной способности в нисходящем канале, достигающее в некоторых случаях двукратного улучшения [3, doc.: 22/1822r0].

Схема Co-SR может быть дополнена специализированными алгоритмами для дальнейшего повышения эффективности. Например, в работе [13] предложен иерархический алгоритм многорукого бандита, определяющий пары <станция-точка доступа>, которые могут одновременно обслуживаться с использованием Co-SR.

Co-SR эффективно сочетается с другими схемами координации. В исследовании [10] представлен подход, объединяющий Co-SR и Co-TDMA, включая методы формирования групп точек доступа. Также Co-SR может использоваться совместно со схемой согласованного формирования диаграммы направленности (Co-BF) на точках доступа с многоканальными антенными системами [3, doc.: 24/0635r0].

7.8. Согласованное формирование диаграммы направленности. Согласованное формирование диаграммы направленности (англ.: Coordinated Beamforming, Co-BF) представляет собой более совершенную схему координации по сравнению с Co-SR. Она позволяет точкам доступа формировать диаграммы направленности для усиления сигнала на целевых приемниках и подавления интерференции на станциях в соседних сетях. Для реализации такого формирования лучей и подавления помех требуется информация о состоянии канала (CSI) от станций в соседних сетях.

Передачи в рамках Co-BF в стандарте 802.11bn, вероятно, будут синхронизированы между различными сетями. Хотя несинхронизированные передачи обеспечивают большую гибкость планирования [3, doc.: 24/0142r1], они увеличивают вероятность ошибок в перекрывающихся сетях из-за двух основных проблем. Во-первых, части преамбулы, передаваемые всенаправленно, могут создавать интерференцию; их направленная передача возможна, но требует существенных изменений в спецификации и устройствах. Во-вторых, неидеальное подавление помех на границах символов вызывает дополнительные искажения [3, doc.: 24/0635r0], которые могут быть уменьшены за счет выравнивания OFDM-символов в пределах защитного интервала или применения специализированных методов формирования сигналов.

Co-BF поддерживает два метода измерения состояния канала: последовательный и параллельный [3, doc.: 24/1582r2]. Последовательный метод является развитием процедуры из стандарта 802.11be для многопользовательских сценариев: координирующая точка доступа отправляет кадр NDP и получает отклик с CSI от своих станций, после чего аналогичные действия выполняют координируемые точки доступа. Этот метод позволяет достичь максимальной производительности при использовании большого числа пространственных потоков и подавлении интерференции на множестве станций. Он также подходит для работы со станциями, имеющими ограниченное число антенн.

При малом числе потоков более эффективным является параллельный метод, при котором точки доступа передают общий кадр NDP с расширенной ортогональной последовательностью для измерения канала. Данный метод обеспечивает дополнительный прирост пропускной способности на 15-50% [3, doc.: 23/0776r1], однако он применим только для более сложных станций с многоканальными антенными

системами, поддерживающих обработку таких NDP-кадров и отправку расширенных CSI-отчетов, а также обладающих передовыми алгоритмами подавления помех. При этом разница в накладных расходах между этими методами незначительна [3, doc.: 24/1582r2].

Стандарт 802.11bn будет поддерживать оба метода, обеспечивая работу в различных сценариях и с оборудованием разного класса.

Схема Co-BF особенно полезна в сценариях с близко расположенными сетями, обслуживающими трафик, чувствительный к задержкам. Результаты моделирования показывают, что Co-BF обеспечивает почти на порядок меньшее значение задержки пакетов в наихудшем случае по сравнению с методами стандарта 802.11ax (см. [1, 66] и [3, doc.: 24/0880r0]). Co-BF также способен удвоить совокупную пропускную способность по сравнению с отсутствием координации или с использованием только Co-SR [3, doc.: 19/0772r1]. Однако максимальная эффективность Co-BF достигается при условиях сильной интерференции между координируемыми сетями, требовании высоких значений SINR со стороны станций и наличии у точек доступа достаточного количества антенн для эффективного формирования лучей и подавления помех [3, doc.: 24/0880r0].

7.9. Совместные передачи. Схема совместной передачи (J-TX) представляет собой наиболее совершенный механизм координации точек доступа. В этой схеме все участвующие точки доступа одновременно передают данные обслуживаемым станциям, функционируя как единая виртуальная многоантенная система.

Для реализации J-TX требуется обмен не только управляющей информацией, но и пользовательскими данными между точками доступа [3, doc.: 22/2188r0]. Ключевыми требованиями для работы J-TX являются высокоскоростные соединения (со скоростью передачи в несколько гигабит в секунду) между точками доступа, а также точная временная и частотная синхронизация [67]. Современные методы синхронизации в целом удовлетворяют этим требованиям [3, doc.: 22/1821r1], однако необходима дополнительная валидация в реальных условиях эксплуатации.

Результаты моделирования [3, doc.: 22/1821r1] демонстрируют, что J-TX обеспечивает более высокое и стабильное отношение сигнала к шуму и интерференции (SINR) по сравнению со схемой Co-BF. Эффективность J-TX напрямую зависит от общего количества пространственных потоков: при использовании одного потока производительность J-TX и Co-BF сопоставима, однако при двух потоках J-TX превосходит Co-BF на 50%. Обе схемы координации существенно превосходят некоординированные подходы, при этом Co-BF обеспечивает несколько меньшую задержку благодаря отсутствию необходимости обмена пользовательскими данными между точками доступа. Моделирование также подтверждает, что J-TX повышает устойчивость к помехам и поддерживает более высокие скорости передачи на больших расстояниях [3, doc.: 22/2188r0].

Несмотря на преимущества, высокая сложность реализации схемы J-TX не позволила включить ее в текущую версию стандарта 802.11bn. Однако в случае успешного внедрения и демонстрации эффективности схемы Co-BF в реальных развертываниях, интерес к более сложным механизмам координации может возрасти. Таким образом, J-TX сохраняет потенциал для будущих версий Wi-Fi и остается актуальным направлением исследований.

7.10. Открытые вопросы. В ключевой для стандарта Wi-Fi 8 области координации сетей с несколькими точками доступа сохраняется ряд нерешенных проблем.

Несмотря на преимущества бесшовного роуминга, для его широкого внедрения предстоит сделать еще многое. Прежде всего, для реализации домена бесшовной мобильности (SMD) в 802.11bn необходимо определить архитектуру и стандартизировать интерфейсы между различными многоканальными точками доступа, включая

оборудование разных производителей [3, doc.: 23/0231r0, 23/0705r0, 23/1131r0]. Кроме того, требуется разработать эффективные процедуры обнаружения точек доступа в пределах SMD, чтобы станции могли легко идентифицировать и подключаться к ним [3, doc.: 23/0705r0].

Особого внимания заслуживают проблемы буферизации, дублирования и нарушения порядка доставки пакетов при роуминге, которые могут вызывать задержки до 20 мс. Актуальной задачей является определение оптимальных стратегий управления буферами точек доступа, обеспечивающих сохранение порядка доставки кадров и масштабируемость при большом количестве устройств [3, doc.: 23/0322r0]. Также остается открытым вопрос обеспечения безопасности при обмене ключами в рамках SMD [3, doc.: 24/0679r4]: необходимо минимизировать объем служебной информации для восстановления соединения, сохраняя его защищенность.

В области координации множества точек доступа сохраняются открытые исследовательские задачи. Основная проблема заключается в количественной оценке преимуществ различных схем Multi-AP в реальных сценариях развертывания. Эти схемы различаются не только потенциальной эффективностью, но и сложностью реализации, требованиями к инфраструктуре и объемом служебного трафика для согласования параметров передачи, расписания, измерений канала и обмена данными.

Схема Co-TDMA сталкивается с дилеммой между справедливостью распределения ресурсов и эффективностью их использования. Выделение части ТХОР координируемой точке доступа снижает задержки ее передач, но может ограничить доступ к ресурсам для других точек доступа и станций. Одним из потенциальных решений является разрешение доступа станциям, не создающим интерференцию координируемой точке доступа, в течение выделенного интервала [3, doc.: 25/0086r0], однако эффективность такого подхода требует дополнительного изучения.

Другой проблемой Co-TDMA являются задержки обработки, связанные с возрастающей сложностью планирования. Для их уменьшения рассматривается введение времени ожидания или предварительное уведомление точек доступа о расписании [3, doc.: 23/0739r1]. Первый подход снижает общую эффективность, второй требует разработки новых форматов служебных кадров. Кроме того, отсутствие точной информации о состоянии буферов устройств и требуемом времени передачи препятствует повышению эффективности, что указывает на необходимость усовершенствования механизмов отчетов о состоянии буфера [3, doc.: 23/0261r0].

Схема Co-OFDMA сталкивается с проблемами координации точек доступа с разными первичными каналами в общей широкой полосе. Для устранения взаимных блокировок можно пропускать соответствующие подканалы, однако постоянное использование этого механизма может привести к неэффективному использованию ресурсов. В работе [68] предложен алгоритм оптимизации пропуска подканалов в сценариях с множественными перекрывающимися сетями, идеи которого могут быть применены для координации точек доступа.

Для обеспечения высокой производительности Co-SR критически важны точность измерений мощности принимаемого сигнала и эффективность обмена этой информацией между точками доступа [3, doc.: 22/1822r0, 22/1970r0]. Актуальной задачей является разработка механизмов точного измерения и оперативного обмена информацией о мощности, а также алгоритмов оптимизации параметров передачи (мощность, сигнально-кодовые конструкции, ширина канала) [3, doc.: 24/0529r1]. Кроме того, требует доработки реализация Co-SR для восходящего канала, особенно для одновременной передачи триггерных кадров [3, doc.: 22/1822r0].

Реализация J-TX требует точной временной и частотной синхронизации точек доступа. Необходимы дополнительные исследования для валидации существующих методов синхронизации и определения их предельных возможностей с учетом таких

параметров, как максимальное количество точек доступа и станций, пропускная способность и длительность передачи.

Особую ценность для J-TX представляет разработка механизмов беспроводной транковой связи между точками доступа, что упростит развертывание и повысит привлекательность схем координации множества точек доступа. Однако достижение высокой пропускной способности беспроводного канала между точками доступа в практических сценариях остается сложной задачей: пропускная способность такого канала должна как минимум превосходить пропускную способность канала “точка доступа–станция”, а в идеале – превышать ее в несколько раз [3, doc.: 19/1588r0]. Введение специализированных интервалов для координации может повысить эффективность [3, doc.: 24/0478r0], однако количественная оценка выигрыша требует дополнительных исследований.

Одной из наиболее сложных задач во всех схемах Multi-AP остается оптимальный выбор координируемых точек доступа. Координирующая точка доступа должна определять, с какими соседними точками доступа делиться ограниченными ресурсами, учитывая предоставленную информацию, такую как требования к трафику с низкой задержкой в каждой из сетей [3, doc.: 24/0941r0]. Оптимальное распределение станций между точками доступа в различных схемах координации также остается открытой проблемой [69].

§ 8. Заключение

Стандарт IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8) знаменует собой качественно новый этап в развитии беспроводных технологий. В отличие от предыдущих поколений, ориентированных в первую очередь на рост пиковой пропускной способности, ключевой целью Wi-Fi 8 является обеспечение сверхнадежной и детерминированной связи в реальных условиях – при наличии помех, в плотных сценариях развертывания и для требовательных классов приложений. Хотя разработка стандарта продолжается, техническим сообществом уже сформировано четкое видение как целевых показателей, так и механизмов их достижения.

В данной статье представлен систематический обзор ключевых направлений развития Wi-Fi 8. Были рассмотрены перспективные сценарии использования, такие как приложения расширенной реальности, промышленный интернет и высокоплотные развертывания. Для этих сценариев определены целевые метрики производительности, включая пропускную способность в условиях низкого SINR, детерминированную задержку, гарантированную надежность доставки и повышенную энергоэффективность.

Детальный анализ нововведений охватывает механизмы на физическом уровне (PHY), подуровне управления доступом к среде (MAC) и в области координации сетей. Среди них – распределенные по поднесущим ресурсные блоки (DRU), неравная модуляция (UEQM), приоритетный доступ (P-EDCA), динамическое управление полосой (DSO, DBE), бесшовный роуминг (SMD) и координация множества точек доступа (Multi-AP). Для каждого механизма выделены ключевые идеи, потенциальные преимущества и нерешенные проблемы, требующие дальнейшего изучения.

Важно отметить, что описанные механизмы создают принципиально новые постановки задач оптимизации. Это требует разработки сложных алгоритмов для управления радиоресурсами, планирования передач и координации устройств, что открывает широкое поле для будущих исследований.

Мы надеемся, что данная статья послужит ценным ориентиром для научного сообщества, поможет сфокусировать усилия на наиболее актуальных проблемах и будет способствовать разработке эффективных решений для Wi-Fi 8, прокладывая путь к созданию сверхнадежных беспроводных сетей следующего поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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 Commun. Mag. 2024. V. 62. № 8. P. 126–132. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2300728>
2. *Reshef E., Cordeiro C.* Future Directions for Wi-Fi 8 and Beyond // IEEE Commun. Mag. 2022. V. 60. № 10. P. 50–55. <https://doi.org/10.1109/MCOM.003.2200037>
3. IEEE 802.11 Wireless LAN (WLAN) Working Group Documents (online). IEEE Standards Association, <https://mentor.ieee.org/802.11/documents>.
4. Future Technology Trends of Terrestrial International Mobile Telecommunications Systems towards 2030 and Beyond. Int. Telecommunication Union (ITU). Rep. M.2516, 2022. <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2516-2022>
5. *Wang C.-X., You X., Gao X., Zhu X., Li Z., Zhang C.* On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies, and Testbeds // IEEE Commun. Surveys Tuts. 2023. V. 25. № 2. P. 905–974. <http://doi.org/10.1109/COMST.2023.3249835>
6. *Chen W., Lin X., Lee J., Toskala A., Sun S., Chiasserini C.F., Liu L.* 5G-Advanced toward 6G: Past, Present, and Future // IEEE J. Sel. Areas Commun. 2023. V. 41. № 6. P. 1592–1619. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3274037>
7. *Lin X.* The Bridge Toward 6G: 5G-Advanced Evolution in 3GPP Release 19 // IEEE Commun. Stand. Mag. 2025. V. 9. № 1. P. 28–35. <http://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.2300063>
8. *Liu X., Chen T., Dong Y., Mao Z., Gan M., Yang X., Lu J.* Wi-Fi 8: Embracing the Millimeter-Wave Era // IEEE Commun. Mag. 2025. V. 63. № 3. P. 69–75. <https://doi.org/10.1109/MCOM.002.2400059>
9. *Carrascosa-Zamacois M., Geraci G., Galati-Giordano L., Jonhsson A., Bellalta B.* Understanding Multi-link Operation in Wi-Fi 7: Performance, Anomalies, and Solutions // Proc. IEEE 34th Annu. Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2023). Toronto, ON, Canada. Sept. 5–8, 2023. P. 1–6. <http://doi.org/10.1109/PIMRC56721.2023.10293865>
10. *Nunez D., Smith M., Bellalta B.* Multi-AP Coordinated Spatial Reuse for Wi-Fi 8: Group Creation and Scheduling // Proc. 21st Mediterranean Communication and Computer Networking Conf. (MedComNet 2023). Island of Ponza, Italy. June 13–15, 2023. P. 203–208. <https://doi.org/10.1109/MedComNet58619.2023.10168857>
11. *Chemrov K., Bankov D., Lyakhov A., Khorov E.* A Scheduler for Real-Time Service in Wi-Fi 8 Multi-AP Networks with Parameterized Spatial Reuse // IEEE Commun. Lett. 2024. V. 28. № 7. P. 1654–1657. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2024.3397489>
12. *Nunez D., Wilhelmi F., Galati-Giordano L., Geraci G., Bellalta B.* Spatial Reuse in IEEE 802.11bn Coordinated Multi-AP WLANs: A Throughput Analysis // Proc. 2024 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN 2024). Belgrade, Serbia. Nov. 25–27, 2024. P. 265–270. <http://doi.org/10.1109/CSCN63874.2024.10849731>
13. *Wojnar M., Ciezobka W., Kosek-Szott K., Rusek K., Szott S., Nunez D., Bellalta B.* IEEE 802.11bn Multi-AP Coordinated Spatial Reuse with Hierarchical Multi-Armed Bandits // IEEE Commun. Lett. 2025. V. 29. № 3. P. 428–432. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2024.3521079>
14. *Val I., López-Pérez D., Kijanka A., Schelstraete S., Muñoz L., Arlandis D., Martínez M.* Wi-Fi 8 Unveiled: Key Features, Multi-AP Coordination, and the Role of C-TDMA, TechRxiv, 2025, <https://doi.org/10.36227/techrxiv.174114571.17876683/v1>.
15. *Nunez D., Imputato P., Avallone S., Smith M., Bellalta B.* Enabling Reliable Latency in Wi-Fi 8 Through Multi-AP Joint Scheduling // IEEE Open J. Commun. Soc. 2025. V. 6. P. 2090–2101. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2025.3549586>
16. *Wilhelmi F., Galati-Giordano L., Fontanesi G.* “It’s Your Turn”: A Novel Channel Contention Mechanism for Improving Wi-Fi’s Reliability, <https://arxiv.org/abs/2410.07874> [cs.NI], 2024.
17. *Wei D., Cao L., Zhang L., Gao X., Yin H.* Optimized Non-Primary Channel Access Design in IEEE 802.11bn, <https://arXiv.org/abs/2405.00227> [cs.NI], 2024.

18. *Cena G., Scanzio S., Cavalcanti D., Frascolla V.* Seamless Redundancy for High Reliability Wi-Fi // Proc. IEEE 19th Int. Conf. on Factory Communication Systems (WFCS 2023). Pavia, Italy. Apr. 26–28, 2023. P. 1–4. <http://doi.org/10.1109/WFCS57264.2023.10144228>
19. *Kim J., Park H.* Multi-Link/Multi-AP Coordination Based Joint Transmission for Seamless Roaming in IEEE 802.11 bn (Wi-Fi 8) // Advances on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications: The 19th Int. Conf. (BWCCA-2024). Lect. Notes Data Eng. Commun. Technol. V. 231. Cham: Springer, 2025. P. 50–59. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76452-3_5
20. *Sanchez-Vital R., Belogaev A., Gomez C., Famaey J., Garcia-Villegas E.* A Primer on AP Power Save in Wi-Fi 8: Overview, Analysis, and Open Challenges // IEEE Wirel. Commun. 2025. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/MCOM.004.2400486>
21. *Karamyshev A., Levitsky I., Bankov D., Khorov E.* A Tutorial on Wi-Fi 8: The Journey to Ultra High Reliability // Probl. Inf. Transm. 2025. V. 61. P. 164–210. <http://doi.org/https://doi.org/10.1134/S003294602502005X>
22. *Kosek-Szott K., Natkaniec M., Szott S., Krasilov A., Lyakhov A., Safonov A., Tinnirello I.* What's New for QoS in IEEE 802.11? // IEEE Netw. 2013. V. 27. № 6. P. 95–104. <https://doi.org/10.1109/MNET.2013.6678933>
23. *Ni Q.* Performance Analysis and Enhancements for IEEE 802.11e Wireless Networks // IEEE Netw. 2005. V. 19. № 4. P. 21–27. <http://doi.org/10.1109/MNET.2005.1470679>
24. *Gast M.S.* 802.11n: A Survival Guide: Wi-Fi above 100 Mbps. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2012.
25. *Gast M.S.* 802.11ac: A Survival Guide: Wi-Fi at Gigabit and Beyond. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2013.
26. *Khorov E., Lyakhov A., Krotov A., Guschin A.* A Survey on IEEE 802.11ah: An Enabling Networking Technology for Smart Cities // Comput. Commun. 2015. V. 58. P. 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.08.008>
27. *Adame T., Bel A., Bellalta B., Barcelo J., Oliver M.* IEEE 802.11ah: The WiFi Approach for M2M Communications // IEEE Wireless Commun. 2014. V. 21. № 6. P. 144–152. <https://doi.org/10.1109/MWC.2014.7000982>
28. *Tian L., Santi S., Seferagić A., Lan J., Famaey J.* Wi-Fi HaLow for the Internet of Things: An Up-to-Date Survey on IEEE 802.11ah Research // J. Netw. Comput. Appl. 2021. V. 182. P. 103036. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103036>
29. *Venkateswaran S.K., Tai C.-L., Ahmed A., Sivakumar R.* Target Wake Time in IEEE 802.11 WLANs: Survey, Challenges, and Opportunities // Comput. Commun. 2025. V. 236. P. 108127. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2025.108127>
30. *Khorov E., Kiryanov A., Lyakhov A., Bianchi G.* A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs // IEEE Commun. Surv. Tutor. 2018. V. 21. № 1. P. 197–216. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099>
31. *Bellalta B.* IEEE 802.11ax: High-Efficiency WLANs // IEEE Wirel. Commun. 2016. V. 23. № 1. P. 38–46. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7422404>
32. *Khorov E., Levitsky I., Akyildiz I.F.* Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7 // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 88664–88688. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993448>
33. *Henry J., Hart B., Gupta B., Smith M.* i-Fi 7 In Depth: Your Guide to Mastering Wi-Fi 7, the 802.11be Protocol, and Their Deployment. Pittsburgh: Addison-Wesley, 2024.
34. IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT). Aug. 2024.
35. *Naik G., Ogbe D., Park J.-M.* Can Wi-Fi 7 Support Real-Time Applications? On the Impact of Multi Link Aggregation on Latency // ICC 2021: Proc. IEEE Int. Conf. on Communications. Montreal, QC, Canada. Aug. 6, 2021. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICC42927.2021.9500256>

36. *Bellalta B., Carrascosa M., Galati-Giordano L., Geraci G.* Delay Analysis of IEEE 802.11be Multi-Link Operation under Finite Load // IEEE Wirel. Commun. Lett. 2023. V. 12. № 4. P. 595–599. <https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3235001>
37. *Alsakati M., Pettersson C., Max S., Moothedath V.N., Gross J.* Performance of 802.11be Wi-Fi 7 with Multi-Link Operation on AR Applications // Proc. 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2023). Glasgow, UK. Mar. 26–29, 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/WCNC55385.2023.10118866>
38. *Iturria-Rivera P.E., Chenier M., Herscovici B., Kantarci B., Erol-Kantarci M.* RL Meets Multi-Link Operation in IEEE 802.11be: Multi-Headed Recurrent Soft-Actor Critic-based Traffic Allocation // ICC 2023: Proc. IEEE Int. Conf. on Communications. Rome, Italy. May 28–June 1, 2023. P. 4001–4006. <https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10279008>
39. *Bankov D.V., Lyakhov A.I., Stepanova E.A., Khorov E.M.* Performance Evaluation of Wi-Fi 7 Networks with Restricted Target Wake Time // Probl. Inf. Transm. 2024. V. 60. № 3. P. 233–254. <https://doi.org/10.1134/S0032946024030062>
40. 20 Myths of Wi-Fi Interference: Dispel Myths to Gain High Performing and Reliable Wireless. Cisco White Paper, 2018. Available at <https://www.wcvt.com/wp-content/uploads/2018/05/myths-of-wifi-interference.pdf>.
41. *Barannikov A., Levitsky I., Khorov E.* False Protection of Real-Time Traffic with Quieting in Heterogeneous Wi-Fi 7 Networks: An Experimental Study // Sensors. 2023. V. 23. № 21. P. 8927 (11 pp.). <https://doi.org/10.3390/s23218927>
42. *Cavalcanti D., Cordeiro C., Smith M., Regev A.* WiFi TSN: Enabling Deterministic Wireless Connectivity over 802.11 // IEEE Commun. Stand. Mag. 2022. V. 6. № 4. P. 22–29. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0002.2200039>
43. *Karamyshev A., Liubogoshchev M., Lyakhov A., Khorov E.* Enabling Industrial Internet of Things with Wi-Fi 6: An Automated Factory Case Study // IEEE Trans. Industr. Inform. 2024. V. 20. № 11. P. 13090–13100. <https://doi.org/10.1109/TII.2024.3431086>
44. IEEE 802.11bn/D0.3: IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems. Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment: Enhancements for Ultra High Reliability (UHR). June 2025.
45. *Ghasempour Y., da Silva C.R.C.M., Cordeiro C., Knightly E.W.* IEEE 802.11ay: Next-Generation 60 GHz Communication for 100 Gb/s Wi-Fi // IEEE Commun. Mag. 2017. V. 55. № 12. P. 186–192. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700393>
46. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Light Communications. Nov. 2023.
47. *Khorov E., Levitsky I.* Current Status and Challenges of Li-Fi: IEEE 802.11bb // IEEE Commun. Stand. Mag. 2022. V. 6. № 2. P. 35–41. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.2100104>
48. *Barannikov A., Levitsky I., Loginov V., Khorov E.* CSI Compression Method with Dual Differential Feedback for Next-Generation Wi-Fi Networks // IEEE Wirel. Commun. Lett. 2025. V. 14. № 2. P. 475–478. <https://doi.org/10.1109/LWC.2024.3510215>
49. *Venkatachalam I., Palaniappan S., Ameerjohn S.* Compressive Sector Selection and Channel Estimation for Optimizing Throughput and Delay in IEEE 802.11ad WLAN // Int. J. Inf. Technol. 2025. V. 17. № 2. P. 987–998. <https://doi.org/10.1007/s41870-024-02235-9>
50. *Crespo Marques E., Maciel N., Naviner L., Cai H., Yang J.* A Review of Sparse Recovery Algorithms // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 1300–1322. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2886471>
51. *Porat R., Ojard E., Jindal N., Fischer M., Erceg V.* Improved MU-MIMO Performance for Future 802.11 Systems Using Differential Feedback // Proc. 2013 Information Theory and Applications Workshop (ITA 2013). San Diego, CA, USA. Feb. 10–15, 2013. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ITA.2013.6502944>

52. Jeon E., Lee W.B., Ahn M., Lee J.W., Kim S., Kim I. Machine Learning-Aided Dual CSI Feedback in Next Generation WLANs // Proc. IEEE 97th Vehicular Technology Conf. (VTC 2023-Spring). Florence, Italy. June 20–23, 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200269>
53. Jiang C., Guo J., Wen C.-K., Jin S., Hou X. Deep Learning-Based Implicit CSI Feedback for Time-Varying Massive MIMO Channels // ICC 2023: Proc. IEEE Int. Conf. on Communications. Rome, Italy. May 28–June 1, 2023. P. 4955–4960. <https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10278654>
54. Chen M., Guo J., Wen C.-K., Jin S., Li G.Y., Yang A. Deep Learning-Based Implicit CSI Feedback in Massive MIMO // IEEE Trans. Commun. 2022. V. 70. № 2. P. 935–950. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3138097>
55. Shen C., Fitz M.P. MIMO-OFDM Beamforming for Improved Channel Estimation // IEEE J. Sel. Areas Commun. 2008. V. 26. № 6. P. 948–959. <http://doi.org/10.1109/JSAC.2008.080811>
56. Jeon E., Ahn M., Kim S., Lee W.B., Kim J. Joint Beamformer and Beamformee Design for Channel Smoothing in WLAN Systems // Proc. 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conf. (VTC2020-Fall). Victoria, BC, Canada. Nov. 8–Dec. 16, 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/VTC2020-Fall149728.2020.9348441>
57. Hoefel R.P.F. IEEE 802.11be: Throughput and Reliability Enhancements for Next Generation Wi-Fi Networks // Proc. 2020 IEEE 31st Annu. Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2020). London, UK. Aug. 31–Sept. 3, 2020. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/PIMRC48278.2020.9217206>
58. Rüterman A.V., Bankov D.V., Lyakhov A.I., Khorov E.M. Modeling of Preemptive Channel Access in Wi-Fi Networks // Probl. Inf. Transm. 2024. V. 60. № 4. P. 327–343. <https://doi.org/10.1134/S0032946024040045>
59. Briscoe B., De Schepper K., Bagnulo M., White G. Low Latency, Low Loss, and Scalable Throughput (L4S) Internet Service: Architecture. IETF RFC 9330, 2023. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc9330/>
60. Stepanova E., Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. On the Joint Usage of Target Wake Time and 802.11ba Wake-Up Radio // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 221061–221076. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3043535>
61. Guérin E., Bégin T., Guérin Lassous I. An Overview of MAC Energy-Saving Mechanisms in Wi-Fi // Comput. Commun. 2023. V. 203. P. 129–145. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.03.003>
62. Yoon Y., Jang I., Choi J., Baek S., Kim G., Cha D., Park E., Lim D., Chun J., Jung I., Cho H.-G., Kim S. Seamless Roaming Procedure. IEEE 802.11-23/1908r2. Nov. 15, 2023. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/23/11-23-1908-00-00bn-seamless-roaming-procedure.pptx>
63. Ahn W. Novel Multi-AP Coordinated Transmission Scheme for 7th Generation WLAN 802.11be // Entropy. 2020. V. 22. № 12. P. 1426 (19 pp.). <https://doi.org/10.3390/e22121426>
64. Lacalle G., Val I., Seijo Ó., Mendicute M., Cavalcanti D., Perez-Ramirez J. Multi-AP Coordination PHY/MAC Management for Industrial Wi-Fi // Proc. 2022 IEEE 27th Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2022). Stuttgart, Germany. Sept. 6–9, 2022. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ETFA52439.2022.9921700>
65. Imputato P., Avallone S. Meeting Latency Constraints in Wi-Fi Through Coordinated OFDMA // Proc. 22nd Mediterranean Communication and Computer Networking Conf. (MedComNet 2024). Nice, France. June 11–13, 2024. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MedComNet62012.2024.10578231>
66. Garcia-Rodriguez A., Lopez-Perez D., Galati-Giordano L., Geraci G. IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 Strikes Back // IEEE Commun. Mag. 2021. V. 59. № 4. P. 102–108. <http://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000711>
67. Sundaravaradhan S.P., Porat R., Toussi K.N. Increasing Spatial Multiplexing Gain in Future Multi-AP Wi-Fi Systems via Joint Transmission // IEEE Commun. Stand. Mag. 2022. V. 6. № 2. P. 20–26. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.2100085>

68. *Levitsky I.A., Tretiakov A.A., Khorov E.M.* Study of Bandwidth Selection Algorithm with Allowed Preamble Puncturing in IEEE 802.11ax and IEEE 802.11be Networks // *J. Commun. Technol. Electron.* 2022. V. 67. № 6. P. 755–763. <https://doi.org/10.1134/S1064226922060134>
69. *Titus A., Bansal R., Sreejith T.V., Kherani A.A., Akhtar N.* Decision Problems for Joint Transmission in Multi-AP Coordination Framework of IEEE 802.11be // *Proc. 2021 Int. Conf. on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS 2021)*. Bangalore, India. Jan. 5–9, 2021. P. 326–333. <https://doi.org/10.1109/COMSNETS51098.2021.9352818>

OVERVIEW OF Wi-Fi 8 TECHNOLOGY: NEW OPPORTUNITIES AND OPEN CHALLENGES

© 2025 **A.Yu. Karamyshev^{a,b}, I.A. Levitsky^{a,b}, D.V. Bankov^{a,b}, E.M. Khorov^{a,b}**

^a*Kharkevich Institute for Information Transmission Problems
of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

^b*Moscow Independent Research Institute of Artificial Intelligence*

*E-mail: karamyshev@wnlab.ru, levitsky@wnlab.ru, bankov@wnlab.ru,
khorov@wnlab.ru*

The Wi-Fi 8 IEEE 802.11bn standard, currently under development, represents the next stage in the evolution of wireless technologies. Unlike previous generations, which focused primarily on increasing peak throughput, the main goal of Wi-Fi 8 is to provide ultra-reliable connectivity and predictable wireless network performance. This is driven by the requirements of new use cases, such as the industrial internet, support for augmented and virtual reality applications, artificial intelligence, and the deployment of dense public networks. Key performance indicators include increased throughput in low signal-to-noise ratio conditions, reduced 95th percentile latency, reduced packet loss, and optimized power consumption. To achieve these goals, new methods are being introduced into the standard, including subcarrier-distributed resource blocks, the use of different modulation and coding structures in different spatial streams, improved channel access methods, seamless roaming, and coordinated management of multiple access points. The article presents the current status of the Wi-Fi 8 standard development, analyzes its performance targets, and discusses relevant technical solutions. It also formulates promising areas of research that require the development of new algorithms and methods for optimizing the use of radio resources to fully realize the potential of the technology. The article will be useful for researchers engaged in mathematical modeling and solving optimization problems in the field of wireless networks. The new Wi-Fi 8 mechanisms described create fundamentally new optimization problems and require the development of appropriate algorithms for radio resource management, transmission planning, and device coordination. The materials in the article will help formulate new optimization models and define objective functions for creating effective algorithms that take into account the specifics of the new standard.

Keywords: Wi-Fi 8, IEEE 802.11bn, wireless networks, ultra-reliable communications, Industrial Internet, latency, access point coordination, artificial intelligence

DOI: 10.7868/S3034583925030016

Received 29.07.2025

Revised 05.09.2025

Accepted 15.09.2025

The research was carried out at the Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences and supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-19-00756, <https://rscf.ru/project/23-19-00756/>.