

# IEEE 802.11be — Wi-Fi 7:

## НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ. Часть 1

С ростом популярности видеоформатов 4k и 8k требования к пропускной способности вырастут до десятков Гбит/с. Кроме того, все большее распространение получают и другие новые способы развлечений, включая дополненную (AR) и виртуальную реальность (VR), а также онлайн-игры. Из-за возрастающих требований поддержка этих приложений в беспроводной локальной сети (WLAN) выходит далеко за рамки возможностей недавно опубликованного стандарта беспроводной сети IEEE 802.11ax. Чтобы удовлетворять этим новым требованиям, комитет, отвечающий за IEEE 802.11, подготовил новую поправку — IEEE 802.11be — Extremely High Throughput (EHT, экстремально высокая пропускная способность), также известную как Wi-Fi 7. Этот цикл статей посвящен всестороннему обзору новой редакции стандарта и его подготовки.

Цайлиан Денг (Cailian Deng)

Сюмин Фэнг (Xuming Fang)

Сяо Хань (Xiao Han)

Сяньбинь Ван (Xianbin Wang)

Ли Ян (Li Yan)

Рон Хэ (Rong He)

Ян Лонг (Yan Long)

Юйчэнь Го (Yuchen Guo)

### Введение

С момента своего появления в 1990-х годах доля WLAN на рынке продолжает расти, и технологии Wi-Fi вносят все больший вклад в предоставление услуг с помощью беспроводной передачи данных. Дома, предприятия, общественные пространства все больше зависят от технологии Wi-Fi, где она используется часто в качестве основной сети передачи данных. Согласно недавнему исследованию, проведенному Wi-Fi Alliance [1], в настоящее время во всем мире работает более 9 млрд Wi-Fi-устройств, включая персональные компьютеры, смартфоны, телевизоры, планшеты, датчики и т. д. Доминирующим типом трафика в WLAN является видеотрафик, и требования к пропускной способности будут продолжать возрастать из-за популярности видеоформатов 4k и 8k, скорость несжатых данных которых достигает 20 Гбит/с. Между тем также становятся популярными новые приложения со строгими требованиями к сверхвысокой пропускной способности и сверхмалой задержке, такие как виртуальная и дополненная реальность, игры (например, для онлайн-игр задержка должна составлять менее 5 мс), удаленная работа, онлайн-видеоконференции и облачные вычисления. И хотя недавно опубликованный стандарт IEEE 802.11ax уделяет значительное внимание параметрам сети и решению проблем в условиях высокой плотности размещения Wi-Fi-устройств, выполнение вышеуказанных требований к высокой пропускной способности и малой задержке выходит далеко за рамки данного стандарта. Чтобы удовлетворять этим новым потребностям, организация по стандартизации IEEE собирается выпустить новую поправку — IEEE 802.11be, для обозначения которой будет использоваться маркировка Wi-Fi 7. В этой статье для обозначения

IEEE 802.11be мы будем в основном использовать аббревиатуру EHT.

В мае 2019 года рабочая группа IEEE 802.11 создала целевую подгруппу и установила цели разработки новой версии WLAN, включая новые режимы PHY и MAC для поддержки максимальной пропускной способности не менее 30 Гбит/с и использование несущих частот 1–7,250 ГГц, а также обеспечение совместимости с предыдущими версиями стандарта IEEE 802.11 и устаревшими устройствами на частотах 2,4; 5 и 6 ГГц [2]. Для достижения поставленных целей были обозначены текущие проблемы, а для их решения изучались усовершенствованные технологии PHY и MAC.

Усовершенствования физического уровня:

- Расширение полосы пропускания свыше 160 МГц. Из-за малой ширины и переполнения нелицензируемых диапазонов 2,4 и 5 ГГц существующие сети WLAN 802.11 (например, IEEE 802.11ax [3]) неизбежно будут страдать от снижения качества обслуживания (QoS) при использовании таких новых приложений, как VR и AR. Чтобы достичь целевого увеличения максимальной пропускной способности (30 Гбит/с), предполагается добавить в EHT новые полосы пропускания, включая сплошную (смежную) полосу 240 МГц, несмежные 160+80 МГц, сплошную 320 МГц и несмежные 160+160 МГц [4]. Тем не менее распределение каналов и планы тональных сигналов для этих новых полос пропускания все еще обсуждаются, например, будет ли 240 МГц/160+80 МГц формироваться путем прокалывания на частотах 320/160+160 МГц, или путем повторения плана тональных сигналов, установленного в IEEE 802.11ax, или с помощью определения нового плана тональных сигналов для 160+160 МГц и 320 МГц. Кроме того, предполагается, что для EHT

будут разработаны методы, повышающие эффективность использования широкополосного и несмежного спектров.

- Назначение нескольких ресурсных единиц (RU) одному пользователю (SU). Согласно IEEE 802.11ax, каждому пользователю для передачи или приема кадров назначается только определенная ресурсная единица, что значительно ограничивает гибкость планирования ресурсов. Для решения этой проблемы и дальнейшего повышения эффективности использования спектра частот рабочая группа EHT одобрила назначение одному пользователю нескольких RU [4]. Однако различные технические аспекты все еще находятся на рассмотрении рабочей группы EHT, в частности такие, как назначение и комбинирование нескольких RU, схемы кодирования и чередования RU, а также схемы передачи сигналов. Поэтому для решения различных вопросов, связанных с применением нескольких RU, необходимо приложить дополнительные усилия.
- 4096-QAM для повышения максимальной скорости передачи данных. Схемой модуляции высшего порядка, предусмотренной в IEEE 802.11ax, является 1024-QAM, где модулированный символ несет 10 бит. Для дальнейшего повышения пиковой скорости рекомендуется использовать 4096-QAM, таким образом модулированный символ сможет передавать 12 бит. Следовательно, при той же скорости кодирования EHT сможет увеличить скорость передачи данных на 20% по сравнению с 1024-QAM. Однако такие аспекты, как стратегии кодирования, количество потоков, требования к модулю вектора ошибки (EVM) и использование нескольких приемных антенн при работе 4096-QAM, все еще нуждаются в изучении и уточнении как в случае работы в режиме передачи одному пользователю, так и в случае многопользовательского (MU) вещания.
- Эффективные форматы преамбулы и механизмы прокальвания преамбулы (прокальвание преамбулы — метод пропуска занятых частотных полос, то есть каналов, прим. пер.). До появления EHT в каждом поколении стандартов WLAN вводились разные форматы преамбулы, которая выполняет такие задачи, как синхронизация, автоматическая регулировка усиления, коррекция времени/частоты, анализ канала, автоматическое определение версии блока данных протокола физического уровня (PPDU) и передача служебных сигналов (например, информации о распределении ресурсов), и т. д. Согласно изложенному в заявке на разработку стандарта [5], преамбулы в EHT должны быть совместимы с предыдущими версиями и устаревшими PPDU, работающими в диапазонах 2,4, 5 и 6 ГГц. Кроме того, в [6] предложено обеспечить и будущую совместимость преамбул. Поскольку в EHT введение различных новых функций, например множественных RU и MU-MIMO, все еще рассматривается, форматы и детали преамбулы, необходимые для поддержки новых технологий и сценариев, еще не сформулированы. Предусмотренное

стандартом IEEE 802.11ax прокальвание преамбулы, позволяющее использовать несмежные каналы, дает возможность Wi-Fi-устройству передавать MU PPDU по всей ширине полосы пропускания (например, 80, 80+80 или 160 МГц), за исключением ее части, проколотой в преамбуле. Однако из-за отсутствия поля SIG-B и связанной с прокальванием информации в преамбуле SU PPDU не может использовать прокальвание преамбулы и должен передаваться только по сплошным полосам пропускания. Таким образом, при разработке EHT может возникнуть потребность в усовершенствовании схемы прокальвания для MU PPDU и разработке схемы прокальвания для SU PPDU.

Новое управление доступом к среде передачи данных:

- Многоканальная работа со значительно увеличенной полосой пропускания. Из-за малой ширины и переполнения нелицензируемых диапазонов 2,4 и 5 ГГц существующие сети WLAN 802.11 (например, IEEE 802.11ax) неизбежно будут страдать от снижения качества обслуживания (QoS) при использовании таких новых приложений, как VR и AR. Чтобы достичь целевого увеличения максимальной пропускной способности (30 Гбит/с), предполагается, что EHT расширит полосу пропускания за счет многодиапазонного агрегирования в диапазонах 2,4, 5 и 6 ГГц и увеличения ширины полосы пропускания до 320 МГц. Однако при многополосном агрегировании возникают такие аспекты, как частотная избирательность канала в гораздо более широкой полосе пропускания, различные типы многодиапазонных операций, а также совместимость с предыдущими версиями и устаревшими STA в диапазонах 2,4, 5 и 6 ГГц. В устаревших многодиапазонных операциях (например, быстрой передаче сеанса (FST) [7]) существует ограничение, заключающееся в том, что блоки служебных данных MAC (MSDU), принадлежащие одному идентификатору трафика (TID), могут использовать только одну полосу, а это приводит к значительному потреблению ресурсов MAC при передаче сеанса. Поэтому для повышения гибкости передачи и минимизации служебных данных, передаваемых для управления доступом к среде, при разработке нового стандарта EHT потребуются изменение моделей MAC. Таким образом, STA сможет передавать кадры с одним и тем же или разными TID по нескольким диапазонам одновременно или не одновременно. С учетом такого улучшения модели MAC термин «многоканальный» (multi-link), используемый в EHT, предпочтительнее термина «многодиапазонный» (multi-band) [8]. Однако для стандартизации многоканальной поддержки необходимо завершить разработку многоканальной архитектуры.
- Увеличение пространственных потоков и усовершенствование MIMO. Чтобы удовлетворить растущие потребности в трафике, вызванные увеличением количества Wi-Fi-

устройств в последние годы, точки доступа обзаводились все большим числом антенн и улучшались возможности пространственного мультиплексирования. Согласно IEEE 802.11ax [3], точка доступа, оснащенная восемью антеннами, может одновременно обслуживать до восьми пользователей при передаче данных как по восходящему (UL), так и по нисходящему (DL) каналу, используя MU-MIMO. Продолжая тенденцию развития возможностей пространственного мультиплексирования точек доступа, стандарт EHT для повышения пропускной способности сети будет рекомендовать увеличить максимальное количество пространственных потоков до 16. Однако увеличение количества пространственных потоков связано с сопутствующим повышением расхода ресурсов, необходимых для получения CSI (информации о состоянии канала). С 16 пространственными потоками повторное использование указанного в текущем стандарте IEEE 802.11ax метода зондирования канала приведет к огромным затратам ресурсов. По этой причине в разрабатываемом стандарте EHT необходимо улучшить существующие явные и неявные схемы обратной связи для сокращения затрачиваемых ресурсов или разработать совершенно новые схемы получения CSI.
- Распределенный режим работы между соседними точками доступа. IEEE 802.11ax предусматривает передачу только к одной точке доступа и от нее без координации между соседними точками доступа. В результате возможности для гибкого использования временных, частотных и пространственных ресурсов значительно ограничиваются. Для улучшения создавшейся ситуации разрабатываемый стандарт EHT расширит возможности обмена данными и управляющей информацией между точками доступа через проводные или беспроводные каналы связи, тем самым повысив эффективность эксплуатации спектра, увеличив пиковую пропускную способность и уменьшив время задержки. Эта важная особенность, отличающая EHT от IEEE 802.11ax, называется многоточечной координацией (multi-AP coordination), которую можно разделить на скоординированное повторное использование пространства (coordinated spatial reuse, CSR), скоординированный множественный доступ с ортогональным частотным разделением (coordinated orthogonal frequency-division multiple access, C-OFDMA), скоординированное формирование луча (coordinated beamforming, CBF) и совместную передачу (joint transmission, JT), при этом степень координации может быть различной. Выбор режимов многоточечной передачи определяется сценарием. В типичной сетевой архитектуре с многоточечным доступом без центрального узла (например, в корпоративной сети) каждая точка доступа должна взаимодействовать с каждой соседней точкой доступа, что приведет к значительному потреблению ресурсов при передаче сигналов и увеличению сложности обработки. Следовательно,

для поддержки всех типов многоточечной координации необходима эффективная процедура координации (включая, кроме прочего, зондирование, выбор точек и многоточечную передачу данных) с низким потреблением ресурсов и с невысокой сложностью обработки. Кроме того, для предотвращения взаимных помех между соседними точками доступа решающее значение имеют точная синхронизация фазы/времени и правильное распределение ресурсов, поскольку несовершенная синхронизация может привести к значительному снижению пиковой пропускной способности.

- Усовершенствованный механизм адаптации канала и повторной передачи. Еще одной важной задачей ЕНТ является надежность передачи. Для обеспечения надежности передачи в случайно меняющихся и подверженных ошибкам беспроводных каналах современные устройства полагаются на повторную передачу блока (блоков) данных с помощью протокола MAC (MPDU, MAC protocol data unit). В протоколе автоматического запроса повтора (ARQ) получатель просто отбрасывает ошибочный MPDU перед получением повторно переданного MPDU. Ожидается, что для соответствия требованиям более высокой надежности и меньшей задержки в ЕНТ будет реализован HARQ (гибридный автоматический запрос на повторение), что для повышения вероятности правильного декодирования позволит использовать программное сочетание (soft combining) или дополнительный контроль четности на стороне приемника. Суть механизма soft combining заключается в том, что приемник будет сохранять неправильно декодированные пакеты и объединять их с последующими

повторными передачами перед декодированием. Тем не менее обсуждаются различные аспекты, касающиеся реализации HARQ, а именно степень детализации повторной передачи (например, агрегированный MPDU (A-MPDU), MPDU или кодовое слово (CW)), процесс HARQ, метод HARQ (например, CC, Chase Combining) или инкрементная избыточность (IR, incremental redundancy), методы адаптации канала для более высокого усиления HARQ и т. д. Вопросы о том, как и на каком уровне поддерживать HARQ, а также какие изменения потребуются на физическом уровне и уровне управления доступом к среде передачи данных, требуют особого внимания.

Авторы этой статьи участвуют в исследованиях и разработке стандартов ЕНТ. Чтобы читатели могли сформировать наиболее полное представление о деятельности по стандартизации ЕНТ, авторы публикуют в этой статье сведения о последних достижениях, полученных при разработке проекта нового стандарта ЕНТ, а также о результатах, связанных с проектом новых академических исследований. Ранее в статье [9] были рассмотрены технические характеристики, обсуждавшиеся на начальных этапах работы над стандартом, представлены результаты моделирования на системном уровне для оценки потенциального увеличения пропускной способности и обсуждены вопросы совместимости с другими технологиями, работающими в диапазоне 6 ГГц. В этой статье мы сосредоточимся на том, какие методы и решения предлагаются рабочей группой ЕНТ для повышения эффективности сети. На рис. 1 представлена структура, показывающая взаимосвязь между разделами этой статьи. Следует отметить, что в статье не рассматривается уровень протокола конвергенции пакетных данных

(PDCP) и уровень управления радиоканалом (RLC), а основное внимание уделяется новым функциям уровней PHY и MAC. Как мы можем видеть на рис. 1, в статье описаны новые важные методы, связанные с PHY, а именно распределение каналов и план тональных сигналов, поддержка множественных ресурсных единиц, 4096-QAM, проектирование и прокалывание преамбулы. Для методов, связанных с MAC, мы в основном будем писать о многоканальных операциях, расширении MIMO, координации нескольких точек доступа и HARQ. Кроме того, мы выдвинули некоторые новые направления исследований, содействующие развитию сетей беспроводной связи, в том числе выходящие за рамки ЕНТ.

## Усовершенствования физического уровня

Для поддержки видеоприложений, требующих высокой пропускной способности и малой задержки, таких как виртуальная и дополненная реальность и онлайн-игры, рассматривается несколько технологий усовершенствования физического уровня, показанных на рис. 2, которые позволяют достигать сверхвысокой пиковой скорости до 30 Гбит/с. Усовершенствования PHY и связанные с ними работы представлены в таблице 1.

- Режимы с более широкой полосой пропускания, включая 320, 160+160, 240 и 160+80 МГц — один из возможных способов увеличения пропускной способности.
- Назначение нескольких ресурсных единиц одному пользователю, позволяющее повысить эффективность использования спектра.
- Для увеличения пиковой скорости по сравнению с 1024-QAM, принятой в IEEE 802.11ax,

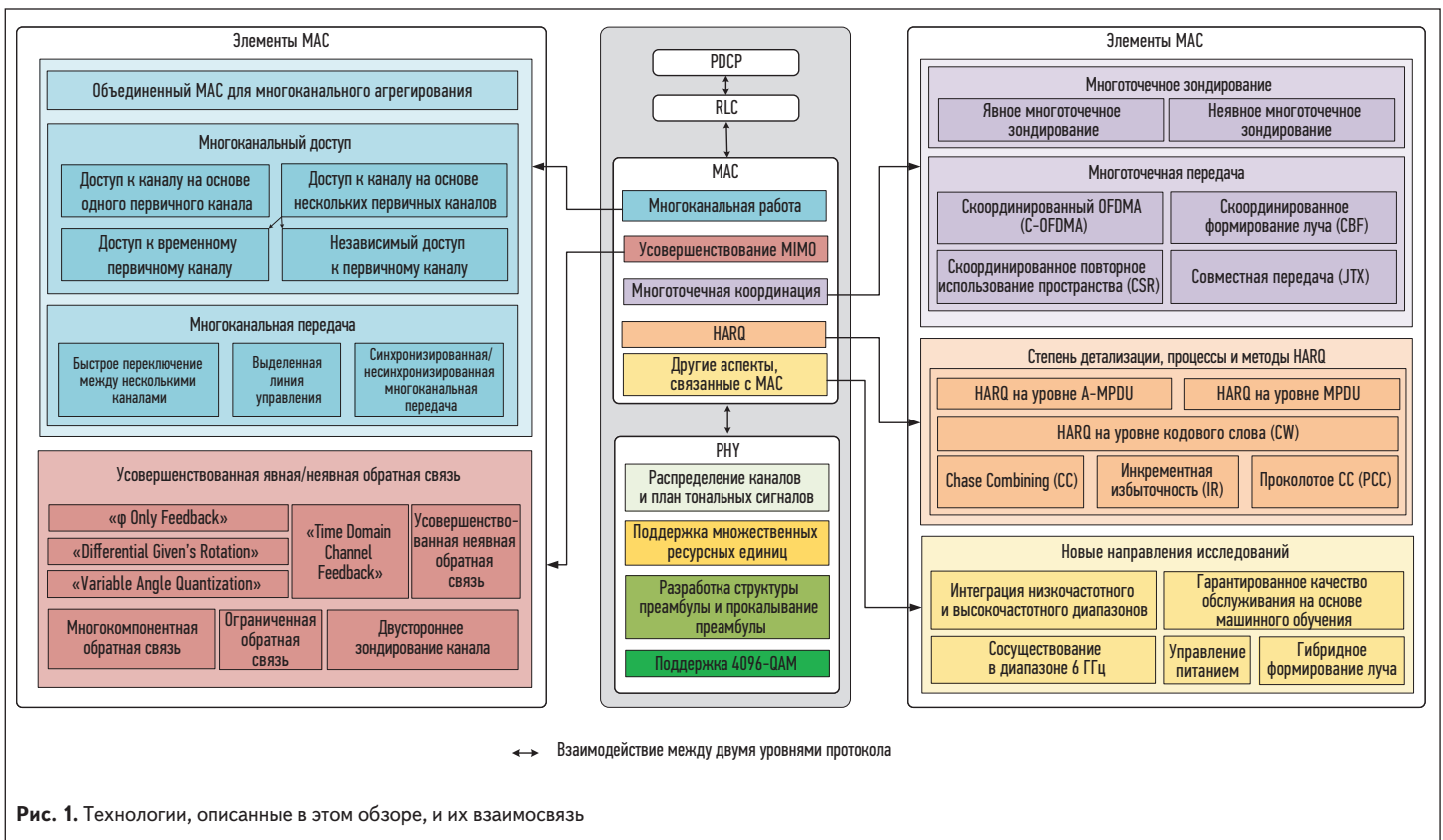


Рис. 1. Технологии, описанные в этом обзоре, и их взаимосвязь

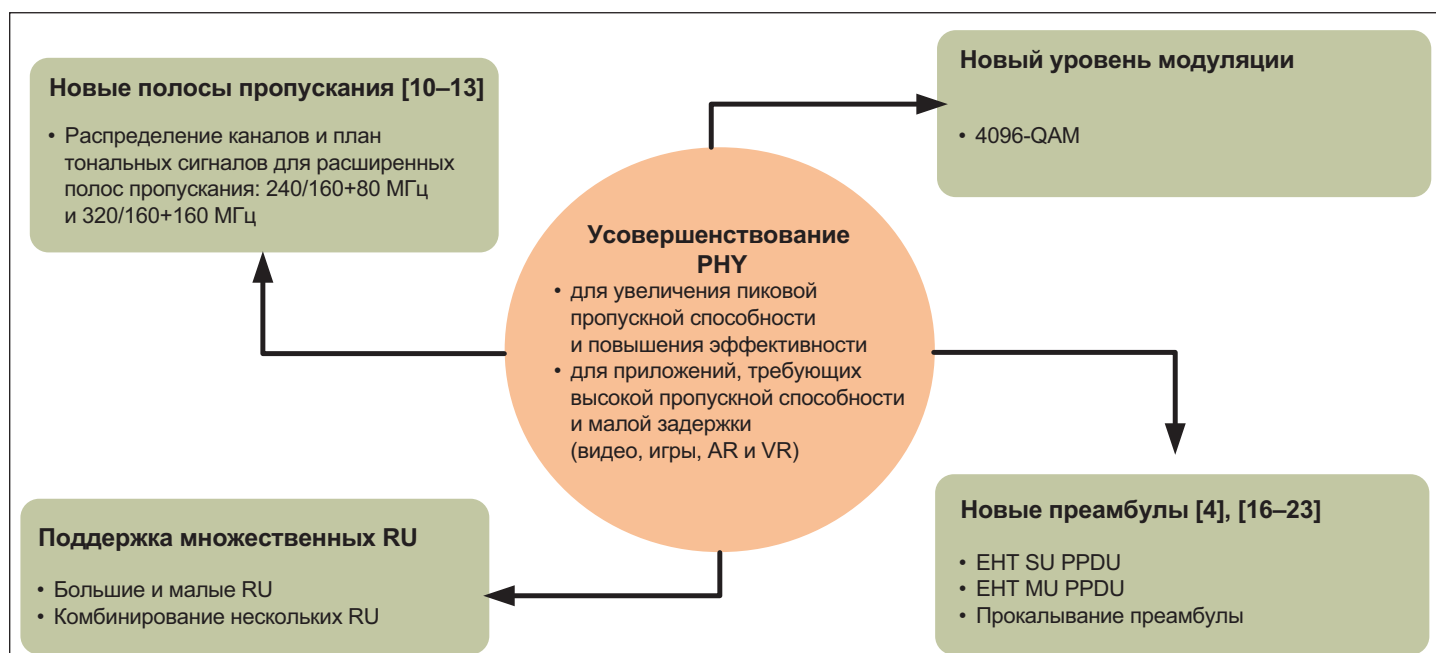


Рис. 2. Основные усовершенствования PHY в EHT

разрабатываемый проект стандарта EHT рекомендует новые стратегии модуляции более высокого порядка, а именно 4096-QAM.

- Рассматриваются два формата преамбулы для SU PPDU и MU PPDU соответственно.

Для повышения спектральной эффективности физического уровня также должен быть принят новый механизм прокалывания преамбулы для блока данных протокола физического уровня, передаваемого на одно или несколько подключенных устройств.

### Новые полосы пропускания

На рис. 3 максимальная достижимая полоса пропускания в диапазонах частот 2,4 и 5 ГГц составляет 40 МГц (две смежные полосы по 20 МГц) и 160 МГц (две смежные/несмежные по 80 МГц) [7] соответственно, что не может обеспечить работу сервисов, требующих высокой пропускной способности и малой задержки, таких как видео 4k/8k, AR, VR и онлайн-игры. В настоящее время регулирующими органами обсуждается новый дополнительный диапазон 6 ГГц для работы сетей WLAN (в США 5,925–7,125 ГГц) [10] с общей доступной полосой пропускания 1,2 ГГц. Новые возможности диапазона 6 ГГц, такие как полоса пропускания до 320 МГц, помогут достичь цели EHT — максимальной пропускной способности не менее 30 Гбит/с. Полоса частот 320 МГц может быть сплошной

Таблица 1. Усовершенствования PHY и сопутствующие работы

Усовершенствования PHY	Работы
Новые полосы пропускания	Поддержка диапазона 6 ГГц [10]
	Многодиапазонные операции, гибкое агрегирование каналов [11, 12]
	Каналы шириной 320 МГц, режимы полос пропускания EHT PPDU и проекты планов тональных сигналов EHT для 320 МГц [13]
Поддержка множественных ресурсных единиц	Использование ресурсных единиц, например одиночных RU, множественных RU, кодирование и т. д. [4]
	Максимальное количество RU, назначенных одному STA, и ограничения на комбинацию и расположение RU [14]
	Обсуждение аспектов, касающихся множественных RU для передачи одному пользователю: формат PPDU, поля данных и сигнализация [15]
Новая преамбула	Три варианта чередования для 320 МГц: заимствование чередования фаз из IEEE 802.11ax/новая разработка, дополнительное чередование фаз, поиск оптимального чередования фаз [16]
	Структура преамбулы [17, 18]
	Матрица P для EHT-LTF и рассмотрение новой размерности матрицы P [19]
	Предложения по совместимости с последующими версиями преамбулы [21]
	Расширение шаблонов прокалывания преамбулы IEEE 802.11ax до 240/320 МГц [22]
Схемы модуляции высшего порядка	Моделирование использования канала при более эффективном прокалывании канала по сравнению с IEEE 802.11ax [23]
	Анализ осуществимости 4096-QAM в различных конфигурациях, в том числе с использованием формирования луча, малого количества потоков и строгих требований к приему EVM или нескольких приемных антенн [24]

и находиться полностью на частоте 6 ГГц или несмежной и находиться в разных полосах (например, частично в полосе 5 ГГц и частично в полосе 6 ГГц). Следуя существующему правилу расширения полосы пропускания в WLAN, полосу пропускания 320 МГц можно разделить на две несмежные (отстоящие друг от друга) полосы по 160 МГц, расположенные в диапазонах 5 и 6 ГГц соответственно.

В настоящее время рабочая группа EHT обсуждает эффективные подходы к использованию смежных и несмежных полос пропускания. М. Паркет и соавторы [11], а также Т. Ву и соавторы [12] предложили стратегию гибкого расширения полосы пропускания, позволяющую получать широкую полосу пропускания за счет многоканального агрегирования в диапазонах 2,4, 5 и 6 ГГц — напри-

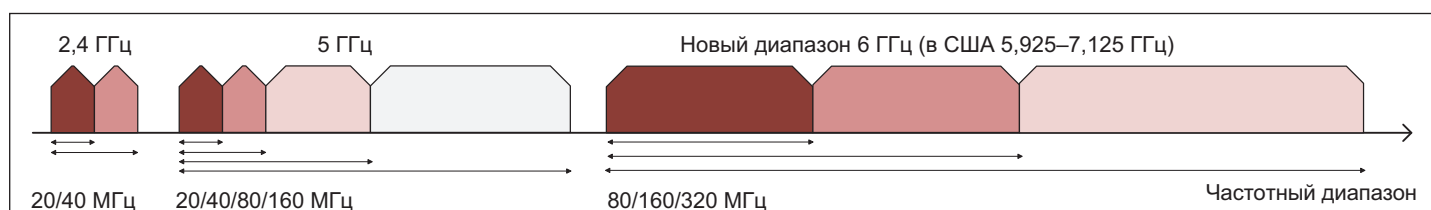


Рис. 3. Доступные полосы пропускания в диапазонах частот 2,4, 5 и 6 ГГц

**Таблица 2.** Применимые комбинации множественных ресурсных единиц для различных режимов полосы пропускания в ЕНТ

Тип	Описание	Допустимые комбинации
Малые RU	26; 52; 106 тонов	<ul style="list-style-type: none"> <li>•RU с 26 тонами + RU с 106 тонами для 20/40 МГц</li> <li>•RU с 26 тонами + RU с 52 тонами для 20/40/80 МГц</li> </ul>
Большие RU	242; 484; 996 тонов; 2 × 996 тонов; 3 × 996 тонов (новое дополнение)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•RU с 242 тонами + RU с 484 тонами для 80 МГц, RU с 484 тонами + RU с 996 тонами для 160 МГц, RU с 242 тонами + RU с 484 тонами + RU с 996 тонами для 160 МГц</li> <li>•RU с 484 тонами + RU с 2×996 тонами для 240 МГц, RU с 2×996 тонами для 240 МГц</li> <li>•RU с 484 тонами + RU с 3×996 тонами для 320 МГц, RU с 3×996 тонами для 320 МГц</li> </ul>

мер, 20/40 МГц (2,4 ГГц) + 20/40/80/160 МГц (5 ГГц) + 80/160/320 МГц (6 ГГц). В ходе предварительного обсуждения было решено, что в качестве новых полос пропускания в ЕНТ будут поддерживаться только смежные 240 МГц, несмежные 160+80 МГц, смежные 320 МГц и несмежные 160+160 МГц. Другие несмежные полосы пропускания (например, 20+40+80 МГц) нежелательны с точки зрения сложности аппаратного обеспечения. Новая полоса 240 МГц/160+80 МГц состоит из трех каналов по 80 МГц, а план тональных сигналов для каждого 80-МГц сегмента такой же, как в IEEE 802.11ax. Тем не менее все еще необходимы дополнительные обсуждения, например о том, формируется ли она путем прокальвания полосы пропускания 80 МГц из 320 МГц/160+160 МГц. Для новой полосы пропускания 320 МГц/160+160 МГц стандарт ЕНТ должен поддерживать дублированный план тональных сигналов IEEE 802.11ax для тонального плана OFDMA полосы 160 МГц. Поскольку структура преамбулы стандарта ЕНТ рассматривается в настоящее время, план тональных сигналов для non-OFDMA (320 МГц/160+160 МГц) также все еще находится в стадии обсуждения. Для передачи OFDMA на частотах 320 МГц/160+160 МГц комбинации ресурсных единиц (RU) большого размера (например, RU 2 × 996 тонов + RU 484 тона) до сих пор не определены. Суть non-OFDMA блока данных протокола физического уровня заключается в реализации прокальвания преамбулы для одного пользователя в формате OFDMA, при этом все ресурсные единицы назначаются одному и тому же пользователю. Для существующей полосы пропускания 20/40/80/160/80+80 МГц стандарт ЕНТ может повторно использовать планы тональных сигналов IEEE 802.11ax. Следует отметить, что часть данных PPDU в ЕНТ использует тот же интервал поднесущих, что и в IEEE 802.11ax [13].

### Множественные ресурсные единицы

В IEEE 802.11ax для передачи по нисходящему и восходящему каналам определены следующие ресурсные единицы (RU): RU с 26 тонами, RU с 52 тонами, RU с 106 тонами, RU с 242 тонами, RU с 484 тонами, RU с 996 тонами и RU с 2×996 тонами. Для повышения эффективности использования спектра рабочей группой ЕНТ была одобрена возможность назначения одному пользователю нескольких RU и внедрены новые RU с 3×996 тонами. Рабочая группа подготовила предварительные схемы комбинирования нескольких RU, схемы кодирования и чередования, а также схемы передачи сигналов. Для достижения компромисса между сложностью комбинирования и эффективностью использования спектра допускается применение только ограниченных комбинаций ресурсных единиц для полос пропускания, не превышающих 160 МГц, то есть малые RU (менее 242 тонов) могут сочетаться только с малыми RU, а большие RU (от 242 тонов и выше) могут сочетаться только с большими RU, смешение малых и больших ресурсных единиц не допускается [4]. В таблице 2 перечислены применимые в ЕНТ комбинации RU для различных полос пропускания, где комбинация малых RU не должна пересекать границу канала 20 МГц, а комбинация RU с 26 тонами и RU с 52 тонами для PPDU 20/40/80 МГц и комбинация RU с 26 тонами и 106 тонами для формата PPDU 20/40 МГц разрешены. Допустимые комбинации крупных RU: RU с 242 тонами + RU с 484 тонами для формата PPDU 80 МГц OFDMA/non-OFDMA и RU с 484 тонами + RU с 996 тонами для PPDU 160 МГц OFDMA/non-OFDMA. В IEEE 802.11ax OFDMA поддерживает только 2/4/8/16 пользователей, в то время как в ЕНТ поддержка множественных ресурсных единиц может обеспечить гибкую поддержку другого числа, например пяти или шести пользователей. В [14] было предложено выделять до трех RU одному пользователю.

Однако до сих пор рабочая группа ЕНТ не достигла консенсуса по максимальному количеству RU, назначаемых одному пользователю.

С точки зрения передачи данных с использованием нескольких RU, к комбинированным RU, назначенным пользователю, может применяться один и тот же или разный набор параметров передачи, таких как индекс модуляции и схемы кодирования (MCS), схемы чередования и количество пространственно-временных потоков. Существует четыре подхода к передаче данных в комбинированных RU [15]:

- все RU кодируются и чередуются независимо друг от друга;
- несколько RU кодируются вместе, но каждая RU чередуется независимо;
- несколько RU нуждаются в чередовании независимо от кодировки;
- несколько RU действуют как одна логическая/непрерывная ресурсная единица.

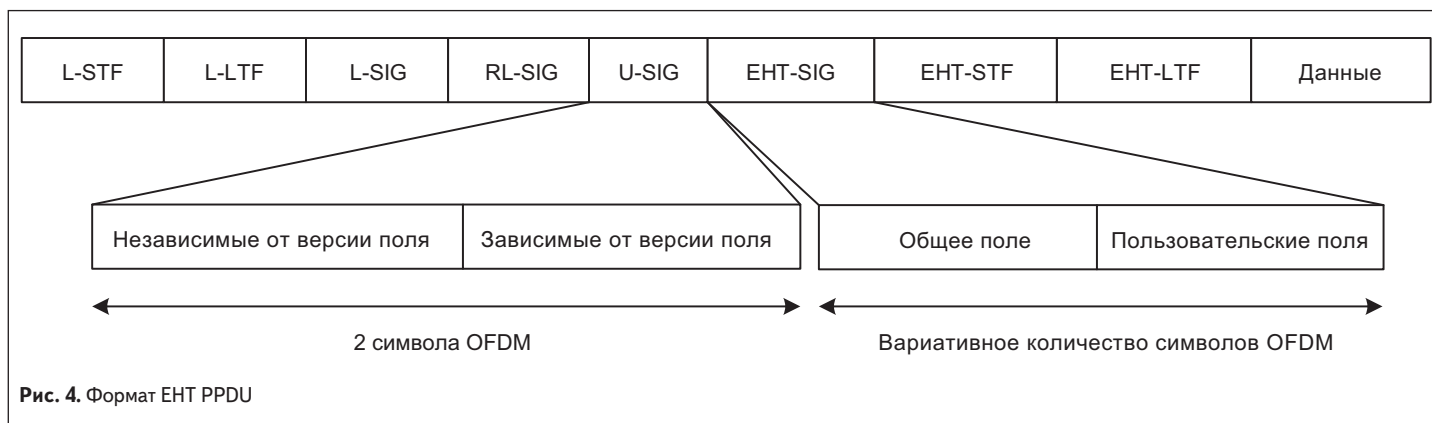
Однако эти возможные подходы необходимо проанализировать и дополнительно оценить с учетом аппаратной сложности и потребления ресурсов при передаче сигналов.

Помимо таких аспектов, как размеры RU, возможные комбинации нескольких RU и т. п., рабочей группе ЕНТ необходимо приложить много усилий для решения вопросов, связанных с передачей сигналов для PPDU с несколькими RU, — например, как повторно использовать/оптимизировать уже имеющиеся в стандарте IEEE 802.11ax методы передачи сигналов для указания размеров и используемой комбинации нескольких ресурсных единиц. В отличие от IEEE 802.11ax, где уникальный идентификатор устройства (STA-ID) используется для одной RU, назначенной конкретному устройству, в ЕНТ для применения нескольких RU необходимо предусмотреть новый вариант STA-ID.

### Преамбулы ЕНТ

Каждый стандарт WLAN имеет свою конкретную преамбулу, которая служит для выполнения таких задач, как синхронизация, анализ канала, автоматическое обнаружение и передача сигналов и т. д. Подобно IEEE 802.11ax, для поддержки различных технологий и сценариев ЕНТ должен определять как минимум новый формат преамбулы для возможных форматов PPDU, таких как ЕНТ SU PPDU, ЕНТ Trigger-based PPDU, ЕНТ ER (расширенный диапазон) SU PPDU и ЕНТ MU PPDU.

Как показано на рис. 4, PPDU ЕНТ состоит из:



- полей, совместимых с предыдущими стандартами, а именно короткое обучающее Non-HT поле (L-STF, legacy non-HT Short Training field), поля LTF (L-LTF), поля SIG (L-SIG, legacy SIG) и повторное поле SIG (RL-SIG, repeat legacy SIGNAL);
- универсального поля SIG (U-SIG, universal SIG);
- поля EHT-SIG;
- короткого обучающего поля EHT (EHT-STF, EHT Short Training field);
- длинного обучающего поля EHT (EHT-LTF, EHT Long Training field)
- поля данных [4].

В частности, для обеспечения совместимости с устаревшими PPDU, работающими в диапазонах 2,4, 5 и 6 ГГц, поля, предусмотренные старыми стандартами, должны идти в начале PPDU стандарта EHT, которое используется для обнаружения кадров, синхронизации и переноса необходимой информации и индикации (например, MCS и длина кадра). Для PPDU с полосой пропускания 160 МГц или меньше устаревшая часть дублируется и может повторно использовать существующую ротацию тонов [16]. Однако для PPDU с полосой более 160 МГц чередование тонов по-прежнему не определено. Для имитации устройств IEEE 802.11ax и соблюдения длины поля L-SIG первый символ после L-SIG в PPDU стандарта EHT должен иметь модуляцию BPSK [17]. Чтобы повысить надежность L-SIG при работе вне помещений и обеспечить автоматическое распознавание устройств стандарта EHT, поле RL-SIG должно отличаться от поля RL-SIG, предусмотренного стандартом IEEE 802.11ax [18].

После поля RL-SIG следует поле U-SIG с двумя символами OFDM, подобное полю HE SIGNAL A (HE-SIG-A) в IEEE 802.11ax, которое используется для передачи информации, необходимой для интерпретации PPDU стандарта EHT [4]. Поле U-SIG содержит как независимые от версии поля, так и поля, зависящие от версии. Независимые от версии поля могут состоять из идентификатора версии PHY, флага UL/DL, «цвета» BSS, типа PPDU, MCS, пропускной способности, возможности передачи (TXOP) и т. д. Зависимые от версии поля, вероятно, будут состоять из аналогичной информации, включенной в HE-SIG-A, кроме информации, включенной в независимые от версии поля, а также новые информационные поля, такие как продолжительность защитного интервала, размер EHT-STF/LTF, флаг пространственно-временного блочного кодирования и т. д. Поскольку обсуждение других характеристик EHT, в том числе агрегирования нескольких каналов и координации нескольких AP, не завершено, многие вопросы, касающиеся структуры, размеров и содержания полей, также находятся на рассмотрении.

Для того чтобы обеспечить эффективную поддержку передачи сигналов PPDU, отправляемых нескольким пользователям, например информацию о выделении ресурсов OFDMA и DL MU-MIMO, в PPDU должно быть предусмотрено переменное поле MCS и поле EHT-SIG переменной длины (сразу после U-SIG). Поле EHT-SIG состоит из общих полей и при необходимости из нескольких пользовательских

полей. Общее поле содержит информацию о распределении ресурсных единиц, кодировании, MCS, количестве пространственно-временных потоков, длительности защитного интервала и т. д. Пользовательские поля содержат выделенную информацию для отдельных пользователей. В SU PPDU поле EHT-SIG состоит только из общих полей, пользовательские поля не применяются. В Trigger-based PPDU EHT-SIG опущен, поскольку вся необходимая информация включена в поле U-SIG. Как и в IEEE 802.11ax, для расширения диапазона размеры полей U-SIG и EHT-SIG в ER SU PPDU, вероятно, будут в два раза больше, чем поля U-SIG и поля EHT-SIG в формате EHT SU PPDU соответственно.

Поля EHT-STF и EHT-LTF, как последняя часть преамбулы EHT, предоставляют пользователям информацию для оценки канала MIMO. EHT может поддерживать три типа EHT-LTF, включая 1x EHT-LTF, 2x EHT-LTF и 4x EHT-LTF [19, 20]. Кроме того, в [21] было рекомендовано повторное использование HE-LTF для EHT-LTF для полос 20/40/80/160/80+80 МГц и предложен метод проектирования EHT-LTF для 240/160+80/320/160+160 МГц.

В более ранних обсуждениях преамбулы, помимо совместимости с устаревшими PPDU, в качестве еще одной проблемы, требующей решения, поднимался вопрос совместимости с версиями PPDU, которые появятся после EHT [5]. Чтобы решить проблему все более сложных форматов преамбулы, важно свести к минимуму сложность как самой структуры, так и ее разработки, сохраняя при этом совместимость с будущими поколениями IEEE 802.11.

Прокалывание преамбулы является эффективным подходом к увеличению использования каналов и повышению скорости передачи. В EHT при полосе пропускания, превышающей 160 МГц, прокалывание преамбулы потребует более сложных аппаратных операций и более гибких шаблонов прокалывания [22, 23], например расширение шаблонов прокалывания преамбулы IEEE 802.11ax до 240/320 МГц или применение прокалывания первичных каналов, позволяющего расширить возможности доступа к каналам.

#### Схемы модуляции высшего порядка

По сравнению с IEEE 802.11ax, где применяется схема модуляции высшего порядка 1024-QAM, для дальнейшего повышения пиковой скорости в EHT была предложена схема модуляции более высокого порядка, то есть 4096-QAM, где один символ модуляции может передавать 12 бит. Теоретически при той же скорости кодирования EHT может обеспечить скорость передачи на 20% выше по сравнению с IEEE 802.11ax, тем самым позволяя своим пользователям получить более высокую скорость передачи, требуя при этом более высокого EVM (модуля вектора ошибки). Результаты предварительного моделирования показывают, что применение 4096-QAM возможно в определенных конфигурациях, таких как формирование луча при передаче, небольшое количество потоков, строгое требование к EVM или применение нескольких приемных антенн [24]. Другие возможные конфигурации, например стратегии кодирования, также тре-

буют дальнейших исследований и проверок с помощью моделирования и экспериментов. Кроме того, EHT-MCS должны быть соответственно определены как для передачи SU, так и для передачи MU.

Чтобы улучшить качество принимаемого сигнала, то есть отношение сигнал-шум (SNR), а также надежность передачи, EHT по-прежнему будет поддерживать модуляцию с двумя несущими (DCM), позволяющую модулировать одну и ту же информацию по паре поднесущих. С целью удовлетворения требований высокой надежности в IEEE 802.11ax модуляция DCM применима только к пространственным потокам MCS 0/1/3/4 и 1/2 [3]. Чтобы гарантировать высокую надежность передачи данных при использовании новых функций EHT, таких как передача пользователю одного и того же кадра через несколько точек доступа или поддержка HARQ, DCM может применяться к схемам модуляции и более высокого порядка (например, MCS 5/6) или большему количеству пространственных потоков (например, 3/4 пространственных потоков).

#### Обобщение сведений о нововведениях физического уровня в EHT

Для того чтобы новые режимы PHY и MAC могли поддерживать максимальную пропускную способность не менее 30 Гбит/с, для стандарта EHT предлагается несколько технологий усовершенствования PHY, включая новые полосы пропускания, поддержку нескольких RU, новые преамбулы и 4096-QAM. Из литературы, посвященной этой теме, мы можем отметить, что рабочая группа EHT внесла вклад в разработку и проверку усовершенствованных технологий PHY. Тем не менее, поскольку разработка стандарта EHT только началась и многие вопросы остаются открытыми, исследовательская работа по усовершенствованиям технологий PHY все еще нуждается в продолжении. К таким темам, требующим дальнейшего рассмотрения, относятся, например, проекты планов тональных сигналов для новых полос пропускания, схемы кодирования и чередования для нескольких назначенных одному пользователю RU, тональные планы сигналов для использования множественных RU, схемы передачи сигнала с множественными RU, возможные конфигурации для применения 4096-QAM, схемы преамбулы. В процессе разработки стандарта EHT целевая группа может обратиться к PHY стандарта IEEE 802.11ax (например, для обратной совместимости и заимствования преамбул ТВ PPDU и ER PPDU), а затем разработать новые технические спецификации PHY (к примеру, внедрение более эффективных методов кодирования/декодирования по сравнению с контролем четности с низкой плотностью (LDPC)).

PHY обеспечивает интерфейс к уровню MAC через расширение универсальных интерфейсов службы PHY, таких как TXVECTOR и RXVECTOR. В частности, MAC-уровень использует TXVECTOR для предоставления PHY параметров передачи для каждого PPDU, а PHY использует RXVECTOR для информирования MAC-уровня о принятых параметрах PPDU. В процессе разработки технических

спецификаций EHT также необходимо четко определить параметры интерфейса и соответствующие значения, такие как количество пространственных потоков, MCS, выделение нескольких RU и ширина канала PPDU. ■

## Литература

1. Wi-Fi Alliance 2018 Wi-Fi predictions. [www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-publishes-2018-wi-fi-predictions](http://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-publishes-2018-wi-fi-predictions)
2. IEEE, Status of Project IEEE P802.11be. IEEE P802.11-TASK GROUP BE (EHT) MEETING UPDATE, 2019. [www.ieee802.org/11/Reports/tgbe\\_update.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/tgbe_update.htm).
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 High Efficiency WLAN, in IEEE P802.11ax/D6.0, November 2019.
4. E. Au et al. Specification Framework for TGbe. IEEE 802.11 Documents, Feb. 2020. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1262&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1262&is_group=00be)
5. Cariou L. et al. EHT draft proposed PAR. IEEE 802.11 Documents, Mar. 2019. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1231&is\\_group=0eht](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1231&is_group=0eht)
6. Vermani S. et al. Forward Compatibility for WiFi Preamble Design,” IEEE 802.11 Documents, Nov. 2019. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1519&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1519&is_group=00be)
7. IEEE Standard for Information Technology — Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks-Specific requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012), Dec.2016.
8. Huang P. et al. Multi-link Operation Framework. IEEE 802.11 Documents, Jul. 2019. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=0773&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=0773&is_group=00be)
9. López-Pérez D., Garcia-Rodriguez A., Galati-Giordano L., Kasslin M., Doppler K. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax // IEEE Communications Magazine. 2019. Vol. 57. No. 9.
10. Tanaka Y. et al. Discussion on 6GHz band support. IEEE 802.11 Documents, Jul. 2019. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=11be&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=11be&is_group=00be)
11. Parket M. et al. Beyond 802.11ax-Throughput Enhancement Utilizing Multi-bands across 2.4/5/6GHz Bands. IEEE 802.11 Documents, May 2018. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=857](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=857)
12. Wu T. et al. EHT discussions on throughput enhancement,” IEEE 802.11 Documents, Jul.2018. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1184](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1184)
13. Tian B. et al. 11be 320MHz channelization and tone plan. IEEE 802.11 Documents, Jul. 2019. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=0797&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=0797&is_group=00be)
14. Schelstraete S. et al. Multi-RU support for OFDMA. IEEE 802.11 Documents, Jan. 2020. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=0108&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=0108&is_group=00be)
15. Yu R. J. et al. Multiple RU discussion. IEEE 802.11 Documents, Jan.2020. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1914&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1914&is_group=00be)
16. Park E. et al. Phase Rotation for 320MHz. IEEE 802.11 Documents, Nov. 2019. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1493&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1493&is_group=00be).
17. Yu R. J. et al. preamble structure in 11be. IEEE 802.11 Documents, Sep. 2019. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1099&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1099&is_group=00be)
18. Chen X. et al. 11be Preamble Structure. IEEE 802.11 Documents, Nov. 2019. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1516&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1516&is_group=00be)
19. Liang D.et al. EHT P matrices Discussion. IEEE 802.11 Documents, Jan. 2020. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1980&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1980&is_group=00be)
20. Liang D.et al. EHT-LTFs Design for Wideband. IEEE 802.11 Documents, Jan. 2020. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=0117&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=0117&is_group=00be)
21. Schelstraete S.et al. 11be preamble and forward compatibility. IEEE 802.11 Documents, Jan. 2020. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=110&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=110&is_group=00be)
22. Ahn W. et al. Wider Bandwidth Channel Access in EHT. IEEE 802.11 Documents, Jul.2019. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1242&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1242&is_group=00be)
23. Redlich O.et al. Improved Preamble Puncturing in 802.11be. IEEE 802.11 Documents, Jul.2019. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1190&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1190&is_group=00be)
24. Schelstraete S.et al. Feasibility of 4096QAM. IEEE 802.11 Documents, Apr. 2019. [www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=0637&is\\_group=00be](http://www.mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=0637&is_group=00be)