

Проблемы создания IEEE 802.11ax — нового поколения сетей Wi-Fi¹

А.Г. Кирьянов*, А. И. Ляхов*, Д. А. Михлина*, Е. М. Хоров*, И.А. Щелкина**

*Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, Москва, Россия

**Российский государственный социальный университет, Москва, Россия

Поступила в редколлегию 11.01.2016

Аннотация—Изначально технология Wi-Fi разрабатывалась как альтернатива проводному доступу в Интернет, но со временем она практически полностью вытеснил проводной доступ. На сегодняшний день беспроводные устройства создают значительную долю в трафика в Интернете, а рынок устройств Wi-Fi постоянно растет. Постоянно увеличивающееся число устройств, объем передаваемых данных и появление новых требований к качеству обслуживания порождает новые трудности и проблемы. Существующая на сегодняшний день технология Wi-Fi неспособна эффективно справиться с этими проблемами, поэтому уже в 2013 году внутри комитета по стандартизации IEEE 802 была создана новая рабочая группа, целью которой было существенно повысить эффективность Wi-Fi к 2019 году. Довольно быстро группа привлекла к себе много внимания со стороны ведущих производителей телекоммуникационного оборудования. В данной работе представлен обзор деятельности этой группы, в котором особое внимание уделено существующим проблемам и способам их решения, предложенными рабочей группой к концу 2015 года.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: IEEE 802.11ax; высокоэффективные беспроводные локальные сети; Wi-Fi; плотные сети.

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние годы эволюция телекоммуникационных технологий была обусловлена необходимостью решения следующих трех проблем.

Первая проблема — это экспоненциальный рост трафика. По прогнозам к 2019 году объем Интернет-трафика увеличится в два раза и превысит порог в два зеттабайта, а объем трафика, генерируемый беспроводными устройствами, в два раза превысит трафик проводных устройств [1].

Вторая проблема заключается в непрерывно растущих требованиях к качеству обслуживания пользователей. К 2019 году 80% трафика будет представлять из себя передачу видео (поток, IPTV, TV и видео по запросу) высокого разрешения [1]. Технология передачи видео потоков должна гарантировать отсутствие раздражающих пауз, прерываний и артефактов на экране.

Последняя, но не менее важная проблема состоит в быстром росте как числа устройств в беспроводных сетях, так и числа беспроводных локальных сетей (WLANs), что неизбежно увеличивает как плотность размещения станций (STAs), так и плотность самих сетей. В результате уже в ближайшее время беспроводные сети будут подвержены высокой внутрисетевой и межсетевой интерференции. Поскольку современные сети Wi-Fi (стандарта IEEE 802.11 [2]) не были разработаны для таких сценариев, в скором времени они уже не смогут эффективно обеспечивать выполнение требований пользователей к качеству обслуживания.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-09350 А.

Для решения описанных проблем в мае 2013 года комитет по стандартизации IEEE 802 создал исследовательскую группу с целью повысить эффективность локальных беспроводных сетей, которая позднее была преобразована в рабочую группу TGax [3]. Задача этой группы — к 2019 году разработать дополнение IEEE 802.11ax к стандарту Wi-Fi [2], которое наряду с увеличением скорости передачи данных повышает эффективность использования беспроводного канала в случае плотного размещения станций. При плотном размещении станций обостряется проблема «скрытых» и «засвеченных» терминалов [4]. Существующие на сегодняшний день механизмы для решения этой проблемы (например, механизм RTS/CTS) зачастую не работают или приводят к неэффективному использованию канальных ресурсов, поэтому в группе TGax ведутся разработки новых методов доступа к каналу и пересматривается существующая концепция занятости среды, лежащая в основе технологии Wi-Fi.

Повышение скоростей передачи данных в нескольких сменяющих друг друга поколениях сетей Wi-Fi (802.11n [5] и 802.11ac [6]) достигалось путем увеличения ширины канала и числа передающих антенн в технологии MIMO (Multiple Input Multiple Output). В частности, дополнение 802.11ac позволяет осуществлять одновременную передачу различных данных нескольким станциям в нисходящем канале (Downlink Multi-user Multiple Input Multiple Output, DL MU MIMO), т.е. от точки доступа к станциям. В группе TGax принято решение применить технологию MU MIMO и для передачи в восходящем канале (Uplink Multi-user Multiple Input Multiple Output, UL MU MIMO), т.е. от станций к точке доступа. Кроме того, для того чтобы более эффективно использовать широкий частотный диапазон и бороться с частотно-селективным замиранием и интерференцией, в Wi-Fi впервые будет применяться множественный доступ с ортогональным частотным разделением (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA). С использованием этих и многих других нововведений группа TGax планирует добиться многократного увеличения пропускной способности при плотном размещении станций. Стоит отметить, что в качестве показателей эффективности работы сети группа TGax рассматривает не только суммарную пропускную способность сети или среднее значение пропускной способности пользователей, но и такие более сложные показатели, как пятипроцентный квантиль пропускной способности и пропускная способность на единицу площади [7]. Использование многоантенных передач, сложных сигнально-кодовых конструкций и широкого спектрального диапазона существенно увеличивают энергопотребление. Поскольку большинство беспроводных устройств (смартфоны, планшеты, ноутбуки) питаются от батареи, то величина энергопотребления также рассматривается в качестве одного из ключевых показателей эффективности сетей Wi-Fi нового поколения.

Дальнейшее изложение статьи построено следующим образом: в разделе 2 описаны основные сценарии использования беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11ax, раздел 3 содержит описание новых механизмов, с помощью которых планируется выполнить обозначенные выше требования к новым сетям Wi-Fi и повысить эффективность их работы. В разделе 4 приведены заключительные выводы.

2. СЦЕНАРИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ: ЧТО НОВОГО?

Дополнение IEEE 802.11ax направлено на повышение эффективности сетей Wi-Fi в широком спектре новых сценариев. В то время как официальный документ [8] описывает 18 сценариев использования, в этой работе мы подчеркнем только их основные особенности. Первая отличительная черта заключается в высокой плотности сетей Wi-Fi. Такая ситуация характерна для стадионов, аэропортов, вокзалов, выставочных залов, торговых центров, когда сотни точек доступа Wi-Fi работают в одной области пространства. Подобное плотное размещение беспроводных сетей характерно и для жилых или офисных зданий: сегодня каждая квартира или офис, как правило, имеет одну или даже несколько точек доступа Wi-Fi.

Вторая особенность связана с типом трафика. В сценариях использования сетей 802.11ax предполагается наличие сильно неоднородного трафика, в то время как в предыдущих дополнениях Wi-Fi каждый сценарий использования, как правило, учитывал только один тип трафика (например, видео-трансляция в режиме реального времени, загрузка файлов или просмотр веб-страниц). В сценариях 802.11ax клиенты одновременно используют разные приложения с разным типом трафика.

Третья особенность заключается в интенсивном использовании восходящего канала в современных беспроводных сетях, что объясняется многочисленными загрузками фото, видео и документов в социальные сети и облачные сервисы.

Наконец, группа TGax уделяет много внимания обратной совместимости, то есть обеспечению эффективной работы «устаревших» станций, которые поддерживают предыдущие дополнения Wi-Fi и не поддерживают дополнение 802.11ax. С одной стороны, необходимо не допустить существенного ухудшения работы «устаревших» станций из-за наличия станций 802.11ax. С другой стороны, присутствие в сети «устаревших» станций может значительно снизить выигрыш, возможный благодаря использованию новых технологий из дополнения 802.11ax. Таким образом, одним из важных вопросов для группы TGax является вопрос обеспечения совместной эффективной работы с «устаревшими» станциями.

3. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

На сегодняшний день группой TGax был выполнен большой объем работ, и появление первой версии нового стандарта ожидается уже в 2016 году. В данном разделе приводится описание новых механизмов, решений и методов, которые были одобрены группой TGax, включены в новое дополнение на момент окончания 2015 года и затрагивают: 1) модификации физического уровня, 2) многопользовательскую передачу, 3) метод доступа к каналу, 4) управление сетями с пересекающимися зонами радиовидимости и пространственное мультиплексирование.

3.1. Модификации физического уровня

Физический уровень, который используется в дополнении 802.11ax, в целом унаследован от дополнений 802.11n и 802.11ac. В сетях 802.11ax также используется мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) и поддерживается работа в частотных каналах шириной 20, 40, 80, 80+80 и 160 МГц. Как было упомянуто выше, новое дополнение будет использовать множественный доступ с ортогональным частотным разделением (OFDMA). Чтобы увеличить количество поднесущих и обеспечить лучшую селективность при использовании технологии OFDMA, размер OFDM-символов, которые используются для передачи блока пользовательских данных, был увеличен в 4 раза, т.е. составляет 12,8 мкс вместо 3,2 мкс [9]. OFDM-символы большей длительности также увеличивают надежность многопользовательской передачи в восходящем канале, так как в этом сценарии из-за неточной синхронизации по времени между передающими пользователями может возникать большой джиттер. В дополнении 802.11ax также увеличен защитный интервал (Guard Interval, GI) между OFDM-символами, что позволяет уменьшить межсимвольную интерференцию. Так как использование более длительного защитного интервала приводит к увеличению накладных расходов, то в новом дополнении предусмотрено три варианта длительности защитного интервала: стандартный 0,8 мкс, а также увеличенные 1,6 мкс и 3,2 мкс [9].

Новое дополнение также модифицирует формат кадров. Каждый кадр начинается с преамбулы, которая, в случае использования канала шириной более 20 МГц, дублируется в каждом подканале шириной 20 МГц, см. рис. 1. Преамбула состоит из двух частей: стандартной части

и преамбулы 802.11ax [10]. Стандартная часть преамбулы может быть декодирована любыми станциями Wi-Fi и используется для обеспечения обратной совместимости с ними. Кроме того, она содержит специальные обучающие последовательности (LSTF и LLTF), которые необходимы для синхронизации приемника и настройки на принимаемый сигнал, а также поле LSIK с информацией, необходимой для вычисления длительности кадра, см. рис. 2. Преамбула 802.11ax может быть декодирована только станциями 802.11ax. Важно уметь быстро и с малой долей ошибки отличить кадр 802.11ax от кадров предыдущих дополнений. Для этого принято решение дублировать поле LSIK стандартной части преамбулы [11]. Обнаружив повтор поля LSIK, 802.11ax-станция детектирует кадр 802.11ax. Новая преамбула содержит обязательное поле HE-SIG-A, опциональное поле HE-SIG-B, а также специальные обучающие последовательности, необходимые для настройки MIMO.

Длительность поля HE-SIG-A составляет два OFDM-символа, которые, в случае использования канала шириной более 20 МГц, дублируются в каждом подканале шириной 20 МГц и содержат информацию, необходимую для приема и обработки пакета: используемую сигнально-кодированную конструкцию (СКК), ширину канала, количество пространственных потоков (Number of Spatial Streams). В последних дополнениях к стандарту Wi-Fi некоторая информация протокола канального уровня (MAC-протокола) была перенесена в преамбулу пакета, например, см. [12]. В группе TGax этот подход получил свое дальнейшее развитие. Например, поле HE-SIG-A содержит такую информацию, как неуникальный идентификатор сети (BSS color, более подробно описанный в разделе 3.4), длительность планируемых передач (Transmission opportunity, TXOP), флаг, указывающий на то, в восходящем или нисходящем канале ведется передача, и др. Наличие данной информации в преамбуле позволяет получить важные сведения без декодирования пакета целиком. Так как поле HE-SIG-A содержит служебную информацию, которая может оказаться полезной не только для предполагаемого(ых) приемника(ов), но и для других станций сети, то необходимо обеспечить надежную передачу данного поля. Для повышения надежности передачи поля HE-SIG-A это поле может быть опционально повторено с применением дополнительной процедуры чередования битов [13].

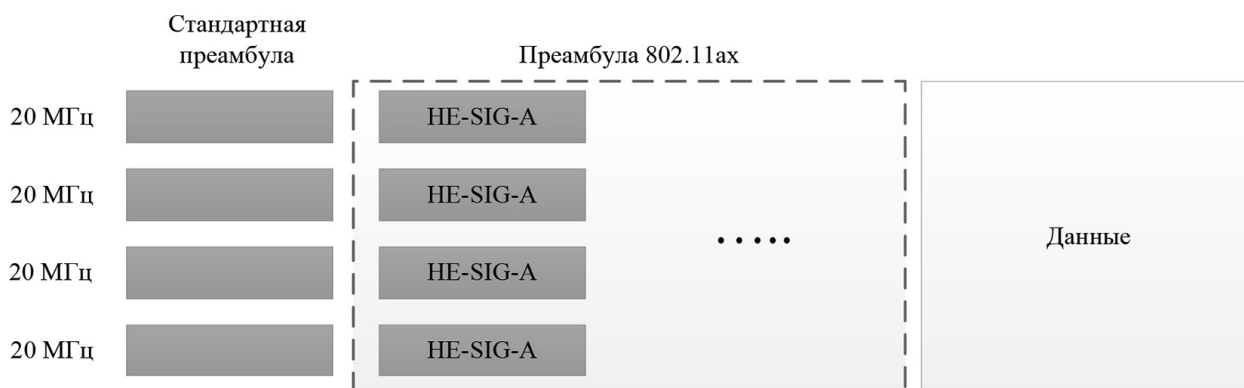


Рис. 1. Стандартная преамбула и поле HE-SIG-A в преамбуле 802.11ax дублируются в каждом подканале шириной 20 МГц.

Размера поля HE-SIG-A в два OFDM-символа достаточно, чтобы включить всю служебную информацию, которая необходима при осуществлении передачи одному получателю. В случае же осуществления многопользовательской передачи нескольким получателям вся служебная информация не может быть помещена в поле HE-SIG-A, поэтому в преамбуле появляется дополнительное поле HE-SIG-B, которое может состоять из переменного числа OFDM-символов. Поле HE-SIG-B содержит как служебную информацию, общую для всех станций-получателей, так и индивидуальную служебную информацию для каждой станции [14], [15].

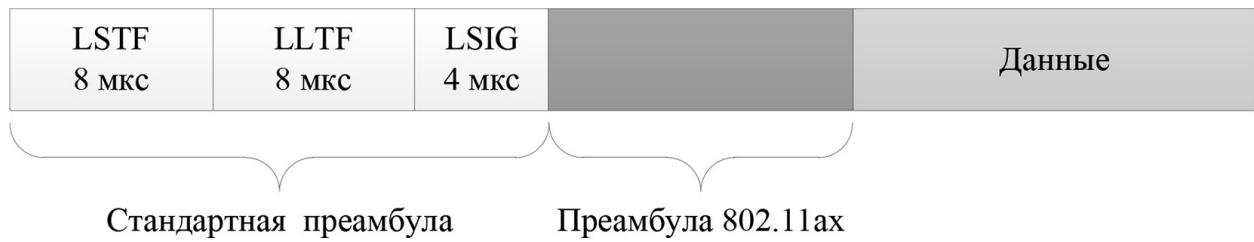
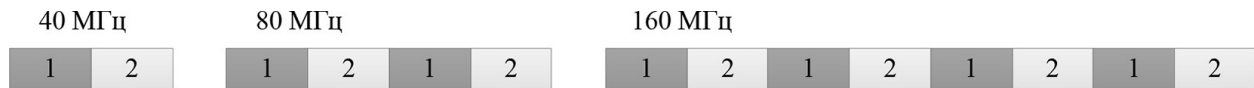


Рис. 2. Структура кадра 802.11ax.

Рис. 3. Содержимое подканалов шириной 20 МГц при передаче поля HE-SIG-B в канале шириной ≥ 40 МГц.

В случае передачи в канале шириной более 20 МГц поле HE-SIG-B, подобно полю HE-SIG-A, дублируется в каждом подканале шириной 20 МГц. Однако для повышения эффективности использования канального ресурса решено использовать следующий подход: при использовании для передачи каналов шириной ≥ 40 МГц два соседних подканала шириной 20 МГц содержат разные части поля HE-SIG-B, в то время как остальные подканалы дублируют информацию [16], см. рис. 3.

В заключение рассмотрим новые схемы модуляции, которые были предложены рабочей группой TGax. Новое дополнение впервые позволяет использовать в сетях Wi-Fi квадратурную модуляцию 1024-QAM [17]. Конечно, использование модуляции такого высокого порядка требует довольно большого отношения сигнал/шум (Signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR), может приводить к частым ошибкам при декодировании и подходит в основном для использования в помещениях при небольшом расстоянии между передатчиком и приемником. Тем не менее, по предварительным исследованиям, использование модуляции 1024-QAM позволяет повысить пропускную способность более чем на 20%. Также дополнение 802.11ax позволяет использовать так называемую двойную модуляцию поднесущей (Dual sub-carrier modulation, DCM) [18]. DCM предполагает передачу одинаковой информации на паре поднесущих, которые расположены достаточно далеко друг от друга в частотной области, что обеспечивает низкую взаимную интерференцию.

Передача служебных кадров потребляет довольно много канального ресурса. Чтобы как-то уменьшить накладные расходы, возникающие из-за наличия служебного трафика, дополнение 802.11ax запрещает передачу биконов и ряда других служебных кадров в диапазоне 2.4 ГГц на скоростях, меньших 5,5 Мбит/с [19].

3.2. Многопользовательские передачи

С выходом дополнения 802.11ac в сетях Wi-Fi впервые появилась возможность осуществлять одновременную передачу разных данных точкой доступа нескольким пользователям. Эта технология получила название DL MU MIMO, так как для передачи используется пространственное мультиплексирование. В силу особенностей распространения радиосигнала иногда можно значительно увеличить суммарную пропускную способность, если выполнять передачу нескольких пространственных потоков пользователям, находящимся в разных областях пространства (технология MU MIMO), а не передачу нескольких пространственных потоков одному пользователю (технология MIMO). В дополнении 802.11ax сделан очередной шаг развития сетей Wi-Fi в этом направлении и предложено решить более сложную задачу — организовать пространственное мультиплексирование в восходящем канале (UL MU MIMO).

Начиная с дополнения 802.11a, одного из первых дополнений к стандарту Wi-Fi, на физическом уровне применяется мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), которое позволяет эффективно организовать широкополосную передачу. Тем не менее, широкополосная передача подвержена частотно-селективной интерференции. Для осуществления многопользовательской передачи в дополнении 802.11ax, кроме технологии ММО, используется также множественный доступ с ортогональным частотным разделением (OFDMA). Важная особенность технологии OFDMA состоит в том, что передача данных может осуществляться на тех поднесущих, которые для данного пользователя наименее подвержены частотно-селективной интерференции. Для выбора таких поднесущих каждая станция отправляет отчеты о качестве передачи с использованием разных поднесущих. Согласно проведенным оценкам [20] выбор поднесущих с учетом обратной связи о качестве передачи позволяет увеличить пропускную способность до 50% по сравнению со случайным выбором поднесущих.

Для управления частотными ресурсами в сети каждая передача может занимать один или несколько ресурсных блоков. В частотной области каждый ресурсный блок может состоять из 26, 52, 106, 242, 484 или 996 поднесущих (включая некоторое число служебных поднесущих). Во временной области длительность ресурсного блока равняется длительности многопользовательской передачи и каждый раз определяется точкой доступа. Таким образом, для данной многопользовательской передачи частотные диапазоны шириной 20 МГц, 40 МГц, 80 МГц и 160 МГц представляют собой один ресурсный блок из 242 поднесущих, два ресурсных блока из 242 поднесущих, два ресурсных блока из 484 поднесущих и два ресурсных блока из 996 поднесущих, соответственно. Каждый такой ресурсный блок, в свою очередь, может быть разделен на два более узких ресурсных блока, и т.д. Однако существует ряд исключений. Например, в канале шириной 20 МГц ресурсный блок из 242 поднесущих может быть заменен на два ресурсных блока, каждый из которых состоит из 106 поднесущих, а в канале шириной ≥ 40 МГц ресурсный блок из 242 поднесущих может быть заменен на два ресурсных блока, каждый из которых состоит из 106 поднесущих, и один ресурсный блок из 26 поднесущих. Хотя технология OFDMA может применяться как при передаче в восходящем, так и при передаче в нисходящем канале, дополнение 802.11ax не позволяет осуществлять передачи в восходящем и нисходящем каналах одновременно.

Рассмотрим подробнее, как организованы передачи в восходящем и нисходящем каналах с помощью технологии OFDMA. В случае передачи в нисходящем канале кадр содержит общую для всех получателей преамбулу, в которой указывается информация о назначении конкретных ресурсных блоков каждому из получателей.

Осуществление многопользовательской передачи в восходящем канале представляет собой более сложную задачу. Многопользовательская передача выполняется синхронно несколькими станциями, а точка доступа выступает в роли координатора и определяет момент начала передачи. Во-первых, она должна получить информацию об имеющихся на станциях данных для передачи, а во-вторых, назначить ресурсные блоки для передачи тем станциям, у которых имеются данные. Стоит также заметить, что точка доступа не знает, будет ли свободен ли канал с точки зрения станции в момент запланированной передачи.

Для информирования точки доступа о наличии на станциях данных для передачи время от времени станции отправляют ей отчеты. Такие отчеты могут иметь различную степень детализации, могут отправляться как по предварительному запросу точки доступа, так и без него [21]. С учетом полученной информации точка доступа определяет длительность передачи в восходящем канале, распределяет ресурсные блоки между станциями и информирует станции об этих и других необходимых параметрах (например, о длительности защитного интервала GI, который должен быть одинаковым для всех станций при многопользовательской передаче).

че в восходящем канале [22]) с помощью отправки нового служебного триггер-кадра (Trigger frame). Для обеспечения синхронизации времени между передающими станциями многопользовательская передача в восходящем канале выполняется непосредственно после получения триггер-кадра [23].

В случае передачи коротких пакетов использование технологии OFDMA позволяет существенно снизить накладные расходы, связанные со временем случайной отсрочки (механизм backoff), межкадровыми интервалами, передачей преамбул и заголовков физического уровня, в которых содержится много одинаковой для всех получателей информации. В частности, новое дополнение позволяет станциям передавать короткие кадры подтверждения путем многопользовательской передачи в восходящем канале сразу после получения многопользовательской передачи в нисходящем канале. В этом случае нисходящая многопользовательская передача содержит также всю необходимую информацию для выполнения восходящей многопользовательской передачи. Дополнение 802.11ax описывает более общий случай, когда передачи в нисходящем и восходящем канале выполняются непосредственно одна за другой и чередуются таким образом на протяжении некоторого интервала времени. Стоит отметить, что каждая очередная многопользовательская передача в нисходящем канале может быть адресована разным подмножествам получателей.

Как упоминалось выше, отдельные передачи, составляющие многопользовательскую передачу, должны быть заключены в одни и те же временные рамки. Если длительность многопользовательской передачи достаточно велика, то станция может передать несколько пакетов, т.е. выполнить агрегирование. Если передача очередного пакета выходит за рамки многопользовательской передачи, то она отменяется и неиспользуемая часть времени оказывается потраченной впустую. Чтобы повысить эффективность использования ресурса в таком сценарии, новое дополнение 802.11ax позволяет станциям фрагментировать пакеты, чтобы заполнить свободное временное пространство передачи [24]¹. Кроме того, станции могут выполнять агрегирование пакетов разных категорий трафика (Access Categories, ACs) для многопользовательской передачи [25]. Схожий подход был предложен в дополнении 802.11ac в случае многопользовательской передачи в нисходящем канале с использованием технологии MU MIMO.

Новое дополнение также повышает эффективность некоторых ранее разработанных механизмов. Так, для защиты многопользовательской передачи от эффекта скрытых станций в группе TGax предлагался механизм MU-Request To Send/Clear To Send (MU-RTS/CTS), схожий с механизмом рукопожатия RTS/CTS и требующий последовательной отправки CTS-кадров каждой из станций [26]. В дополнении 802.11ax передача коротких CTS-кадров может быть выполнена одновременно путем многопользовательской передачи в восходящем канале, что оказывается более эффективным.

Чтобы уменьшить накладные расходы, связанные с необходимостью подтверждения многопользовательской передачи в восходящем канале, группа TGax определила новый кадр Multi-STA BA [27] [28]. Новый кадр является модификацией существующего кадра Multi-TID BA, который использовался для подтверждения получения пакетов разных категорий трафика. Кадр Multi-STA BA может быть отправлен широкополосно с использованием достаточно короткой стандартной преамбулы из дополнения 802.11a, что позволяет уменьшить длительность передачи. Новое дополнение также определяет кадр MU Block ACK Request (BAR), который позволяет точке доступа запросить подтверждения о получении пакетов сразу у нескольких станций вместо отправки индивидуальных кадров BAR каждой станции в отдельности [29]. Подобно Multi-STA BA, MU BAR может передаваться в режиме с короткой преамбулой 802.11a.

¹ Согласно предыдущим версиям стандарта Wi-Fi единственной причиной для фрагментации пакета являлось превышение длиной пакета порога фрагментации. Более того, совместное использование фрагментации и агрегирования явно запрещалось.

3.3. Доступ к каналу

При осуществлении многопользовательской передачи в восходящем канале с использованием технологий OFDMA и MIMO помимо метода детерминированного доступа к каналу новое дополнение также описывает метод случайного доступа [30], схожий с системами Алоха. Случайный доступ оказывается полезным, когда точка доступа не знает о наличии на станциях пакетов для передачи и не может адресно выделить им ресурсы. Хотя производительность систем типа Алоха хуже, чем систем CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance, множественный доступ с контролем несущей и избеганием коллизий), системы такого типа намного проще в реализации. Механизм, предложенный в дополнении 802.11ah работает следующим образом. Время от времени точка доступа отправляет особый триггер-кадр, инициализирующий случайный доступ, который определяет набор ресурсных блоков для осуществления многопользовательской передачи в восходящем канале. Каждая станция, которая хочет осуществить передачу, запускает процедуру OFDMA Back-off (OBO) [31], суть которой состоит в следующем. При инициализации процедуры станция выбирает случайное целочисленное значение из некоторого окна, параметры которого точка доступа может сообщить внутри триггер-кадра [32]. При получении каждого триггер-кадра, инициализирующего случайный доступ, станция уменьшает выбранное значение на количество ресурсных блоков, указанное в данном триггер-кадре, до тех пор, пока оно не достигнет нуля. После этого станция случайным образом выбирает номер ресурсного блока из полученного набора и передает свой пакет в данном ресурсном блоке. Передача в восходящем канале происходит непосредственно после получения триггер-кадра, инициализирующего случайный доступ.

Для повышения энергоэффективности точка доступа может заранее определить один или несколько моментов передачи триггер-кадров, инициализирующих случайный доступ, например, указав это в рассылаемых биконах [33]. Кроме того, триггер-кадр может содержать указание на то, что после текущей многопользовательской передачи в восходящем канале и, возможно, кадров подтверждения в нисходящем канале, будет передан очередной триггер-кадр. Таким образом, некоторые станции могут значительно снизить энергопотребление, находясь большую часть времени в режиме сна [33].

Для повышения энергоэффективности новое дополнение 802.11ah включает в поле HE-SIG-A преамбулы пакета некоторую информацию протокола канального уровня: длительность планируемых передач, направление передачи (восходящий или нисходящий канал) и др. Наличие такой информации предоставляет возможность в определенных ситуациях не тратить энергию на декодирование пакета целиком и сразу после получения преамбулы перейти в режим сна.

Кроме того, группа TGah заимствовала механизм пробуждения по времени (TWT, Target Wakeup Time) из дополнения 802.11ah [37]. Механизм TWT позволяет точке доступа запланировать интервалы времени, в течение которых определенная станция будет готова обмениваться данными. Благодаря такому планированию, станция может оставаться в режиме сна вне данных интервалов, в том числе, и во время передачи точкой доступа бикон, что позволяет заметно снизить энергопотребление.

3.4. Управление сетями с пересекающимися зонами радиовидимости и пространственное мультиплексирование

Для повышения производительности сетей Wi-Fi в сценариях с плотным размещением точек доступа дополнение 802.11ah содержит ряд методов, которые повышают эффективность использования канальных ресурсов сетями с перекрывающимися областями радиовидимости (Overlapped BSS, OBSS). Чтобы снизить негативный эффект от скрытых и засвеченных станций, в группе TGah было сделано уже более 70 различных предложений, большинство из

которых, к сожалению, не были утверждены. Ниже приведено краткое описание принятых решений.

В сетях Wi-Fi, чтобы определить, свободна среда для передачи или нет, каждая станция осуществляет ее прослушивание. В случае успешного декодирования преамбулы пакета станция считает среду занятой в течение указанной длительности передачи пакета. Также среда считается занятой, если станция детектирует наличие шума в канале, мощность которого превышает порог чувствительности не менее чем на 20 дБм. Стандарт Wi-Fi также содержит понятие виртуальной занятости среды (механизм NAV, Network Allocation Vector). NAV можно представить как счетчик, уменьшающийся с течением времени от некоторого положительного значения до нуля. Если он равен нулю, то канал свободен, иначе — занят. Значение счетчика инициализируется при получении кадров. Заголовок кадра, генерируемый протоколом канального уровня, содержит поле Duration, в котором указывается планируемая длительность последующих передач (значение NAV). Получив очередной пакет, станция обновляет NAV, если значение Duration в данном кадре превышает текущее значение NAV, сохраненное на станции. Значение NAV может быть сброшено раньше времени, при получении кадра CF-End.

Согласно предыдущим дополнениям к стандарту Wi-Fi детектирование виртуальной занятости среды не зависит от того, к какой сети принадлежит станция, занявшая среду². Таким образом, на каждой станции имеется индикатор физической занятости среды и одно значение NAV, характеризующее виртуальную занятость среды. Одна из ключевых идей группы TGax — позволить учитывать при детектировании занятости среды, ведется ли передача внутри своей собственной сети или же внутри чужой сети. В зависимости от этого станция может использовать различные пороги чувствительности, подстраивать мощность своей передачи, пересматривать значение NAV с целью лучшего пространственного мультиплексирования [38]. Кроме того, новое дополнение позволяет хранить несколько значений NAV, полученных от разных сетей, и предотвращает некорректное сбрасывание виртуальной занятости среды, установленное из-за передачи пакета внутри одной сети, при получении кадра CF-End от другой сети [39].

Для быстрого определения принадлежности принимаемого пакета к определенной сети без декодирования пакета целиком, преамбула 802.11ax содержит поле «цвет сети» (BSS color), в котором передается неуникальный идентификатор сети [40]. Значение «цвета» выбирается точкой доступа случайным образом в момент инициализации сети. Впервые поле «цвет сети» появилось в дополнении 802.11ah, и его длина составляла всего 3 бита. В новом дополнении 802.11ax размер поля планируется увеличить до 6 битов для уменьшения вероятности совпадения цветов у двух сетей, находящихся в области радиовидимости [41].

В завершение рассмотрим широко распространенный на сегодняшний день сценарий, в котором одна точка доступа создает несколько беспроводных сетей, т.е. реализует функционал нескольких виртуальных точек доступа. Одно современное устройство может выполнять роль до 32 виртуальных точек доступа, каждая из которых будет передавать свою служебную информацию (в т.ч. биконы) в отдельных пакетах, несмотря на то, что многие данные могут дублироваться. Чтобы уменьшить возникающие в такой ситуации накладные расходы, в дополнении 802.11ax вводится идентификатор нескольких сетей (Multiple BSSID), наличие которого позволяет отправлять одинаковую для всех сетей информацию одновременно [42], например, в общем биконе.

² Исключением является дополнение 802.11ad, которое широко использует направленные передачи.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен обзор наиболее значимых решений и механизмов, которые включены в новое дополнение IEEE 802.11ax к стандарту Wi-Fi по состоянию на ноябрь 2015 года. К их числу можно отнести многопользовательскую передачу данных в восходящем канале, модуляцию 1024-QAM, усовершенствованные методы случайного и детерминированного доступа к среде, а также механизмы пространственного мультиплексирования и управления сетями с пересекающимися зонами радиовидимости. Все разработанные решения нацелены на многократное увеличение пропускной способности сетей Wi-Fi в сценариях с плотным размещением станций. Детальное изучение предложенных нововведений безусловно привлечет внимание со стороны большого числа исследователей со всего мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014-2019 White Paper. http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.html
2. 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 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007). March 29, 2012. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6178212&isnumber=6178210>
3. Osama Aboul-Magd, et al. IEEE 802.11 HEW SG Proposed CSD, 2014. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0169-01-0hew-ieee-802-11-hew-sg-proposed-csd.docx>
4. Andrew Tanenbaum, et al. Computer networks, 4-th edition //ed: Prentice Hall, 2003.
5. 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 5: Enhancements for Higher Throughput. IEEE Std 802.11n-2009 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007). October 29, 2009. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5307322&isnumber=5307317>
6. 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 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz. IEEE Std 802.11ac-2013 (Amendment to IEEE Std 802.11-2012). December 18, 2013. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6687187&isnumber=6687186>
7. Lei Wang, et al. Proposed 802.11ax Functional Requirements, 2014. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-1009-02-00ax-proposed-802-11ax-functional-requirements.doc>
8. Laurent Cariou, et al. TGax Usage Models document, 2013. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/13/11-13-0657-06-0hew-hew-sg-usage-models-and-requirements-liaison-with-wfa.ppt>
9. Sriram Venkateswaran, et al. Payload Symbol Size for 11ax, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0099-03-00ax-payload-symbol-size-for-11ax.pptx>
10. Jiayin Zhang, et al. Preamble structure for 11ax system, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0101-01-00ax-preamble-structure-for-11ax-system.pptx>
11. Hongyuan Zhang, et al. 802.11ax Preamble Design and Auto-detection, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0579-04-00ax-preamble-design-and-autodetection.pptx>
12. Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov, Alexander Krotov, Andrey Guschin. A survey on IEEE 802.11ah: an Enabling Networking Technology for Smart Cities. Computer Communications, Volume 58, March 2015, pp. 53–69, 2015.

13. Jiayin Zhang, et al. HE-SIGA transmission for range extension, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0826-03-00ax-he-sig-a-transmission-for-range-extension.pptx>
14. Joonsuk Kim, et al. HE-SIG-B Structure, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0821-02-00ax-he-sig-b-structure.pptx>
15. Ron Porat, et al. SIG-B Encoding Structure Part II, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1059-02-00ax-sig-b-encoding-structure-part-ii.pptx>
16. Ron Porat, et al. SIG-B Encoding Structure, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0873-00-00ax-sig-b-encoding-structure.pptx>
17. Eunsung Park, et al. 1024 QAM Proposal, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1070-03-00ax-1024-qam-proposal.ppt>
18. Jianhan Liu, et al. Reliable Dual Sub-Carrier Modulations (DCM) for HE-SIG-B and Data, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1068-01-00ax-reliable-transmission-schemes-for-he-sig-b-and-data.pptx>
19. Guido R. Hiertz, et al. Minimal data rates for management frame transmissions in 2.4 GHz, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0874-00-00ax-minimal-data-rates-management-frame-transmissions-in-2-4-ghz.pptx>
20. Kome Oteri, et al. Further Analysis of Feedback and Frequency Selective Scheduling (FSS) for TGax OFDMA, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0818-01-00ax-further-analysis-of-feedback-and-frequency-selective-scheduling-fss-for-tgax-ofdma.pptx>
21. Alfred Asterjadhi, et al. Buffer Status Report, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1120-00-00ax-buffer-status-report.pptx>
22. Zhigang Rong, et al. CP Indication for UL MU Transmission, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0813-00-00ax-cp-indication-for-ul-mu-transmission.pptx>
23. Simone Merlin, et al. Trigger Frame Format, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0877-01-00ax-trigger-frame-format.pptx>
24. Chittabrata Ghosh, et al. Fragmentation with MU Operation, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1102-00-00ax-fragmentation-with-mu-operation.pptx>
25. Chao-Chun Wang, et al. UL multi-TIDs aggregation, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1065-01-00ax-11ax-uplink-multi-tid-aggregation.pptx>
26. Po-Kai Huang, et al. MU-RTS/CTS for DL MU, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0867-01-00ax-mu-rts-cts-for-dl-mu.pptx>
27. Simone Merlin, et al. Multi-STA Acknowledgment <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0366-02-00ax-multi-sta-ba.pptx>
28. Jeongki Kim, et al. Further consideration on Multi-STA Block ACK, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0626-01-00ax-further-consideration-for-multi-sta-block-ack-frame.pptx>
29. Guoqing Li, et al. Multi-User Block ACK Request (MU-BAR) , 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1053-01-00ax-multiuser-block-ack-request-mu-bar.pptx>
30. Chittabrata Ghosh, et al. Random Access with Trigger Frames using OFDMA, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0875-01-00ax-random-access-with-trigger-frames-using-ofdma.pptx>
31. Chittabrata Ghosh, et al. UL OFDMA-based Random Access Procedure, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1105-00-00ax-ul-ofdma-based-random-access-procedure.pptx>
32. Russell Huang, et al. Triggered OFDMA Random Access Observations, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1137-01-00ax-triggered-ofdma-random-access-observations.pptx>

33. Chittabrata Ghosh, et al. Power Save with Random Access, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1107-00-00ax-power-save-with-random-access.pptx>
34. Sean Coffey, et al. Airtime Analysis of EDCA, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1114-01-00ax-airtime-analysis-of-edca.pptx>
35. High Efficiency in Accessing the Medium, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1115-01-00ax-high-efficiency-in-accessing-the-medium.pptx>
36. Ivanov A.S. Lyakhov A.I. and Khorov E.M. Analytical Model of Batch Flow Multihop Transmission in Wireless Networks with Channel Reservations //Automation and Remote Control. July 2015, Volume 76, Issue 7, pp 1179-1192.
37. IEEE P802.11ah/D5.0 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 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation. March 2015.
38. Reza Hedayat, et al. TXOP Considerations for Spatial Reuse, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1104-04-00ax-txop-considerations-for-spatial-reuse.pptx>
39. Evgeny Khorov, et al. Multiple NAVs for Spatial Reuse, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1348-00-00ax-multiple-navs-for-spatial-reuse.pptx>
40. Alfred Asterjadhi, et al. Identifiers in HE PPDU for power saving, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1122-00-00ax-identifiers-in-he-ppdus-for-power-saving.ppt>
41. Yasuhiko Inoue, et al. Number of BSS Color bits, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1075-01-00ax-number-of-bss-color-bits.pptx>
42. Guido R. Hiertz, et al. Multiple BSSID element, 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1014-00-00ax-multiple-bssid-element.pptx>

Problems of Developing IEEE 802.11ax: New Generation Wi-Fi networks

A.G. Kiryanov, A.I. Lyakhov, D.A. Mikhлина, E.M. Khorov, I.A. Schelkina

Initially, Wi-Fi technology was developed as an alternative to wired Internet access, but eventually Wi-Fi almost completely superseded wired access. Today, wireless devices create a significant share of traffic on the Internet, and the market of Wi-Fi devices is constantly growing. An ever increasing number of devices, the volume of data transmitted and the emergence of new quality-of-service requirements give rise to new challenges and problems. Currently existing Wi-Fi technology is unable to cope effectively with these challenges, so in 2013 a new working group aiming to significantly improve the efficiency of Wi-Fi technology by 2019 was created within the IEEE 802 Standards Committee. Pretty soon a group attracted much attention from leading manufacturers of telecommunications equipment. This paper presents an overview of activities of this group, paying much attention to existing problems and possible solutions that have been proposed by the working group by the end of 2015.

KEYWORDS: IEEE 802.11ax; high efficiency wireless local area networks, Wi-Fi; dense networks.