

Анализ повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов в сетях Wi-Fi 6

Е.М. Хоров, А.В. Кротов

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук
Поступила в редколлегию 01.12.2023. Принята 20.12.2023

Аннотация—Для эффективной работы высокоплотных сетей Wi-Fi, стандарт IEEE 802.11 описывает несколько механизмов, улучшающих пространственное повторное использование радиочастотных ресурсов. Однако стандарт не определяет, как их использовать. Более того, не учитывается то, как эти механизмы взаимодействуют с другими важными механизмами Wi-Fi. К сожалению, игнорирование этого важного аспекта приводит к почти нулевой выгоде от новых методов. В статье анализируется эта проблема и предлагаются некоторые правила, которые должны улучшить производительность сетей Wi-Fi 6, использующих пространственное повторное использование радиочастотных ресурсов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Wi-Fi 6, повторное использование радиочастотных ресурсов, плотные сети.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_4_630

1. ВВЕДЕНИЕ

Новый стандарт 802.11ax-2021 [1], также известный как Wi-Fi 6, был выпущен IEEE для решения проблем, вызванных возросшей плотностью сетей Wi-Fi, из-за которой соседние сети вынужденно используют один и тот же канал. Стандарт позволяет повысить производительность благодаря таким методам, как OFDMA (англ.: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), а также новым методам повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов (англ.: Spatial Reuse).

Цель разработчиков 802.11ax заключалась в увеличении пропускной способности на пользовательском уровне в четыре раза по сравнению с 802.11ac. Хотя новые сигнально-кодовые конструкции (СКК) приводят только к 37%-ному увеличению номинальных скоростей передачи данных, ожидается, что оставшийся прирост будет достигнут за счет более эффективного использования канала [1]. С помощью OFDMA можно обеспечить эффективное использование подканалов, особенно в сценариях, подверженных частотно-селективному замиранию и интерференции от соседних устройств. Так, устройства, передающие данные, могут использовать подканалы с низкой интерференцией.

Подходы к повторному пространственному использованию радиочастот в 802.11ax означают сдвиг парадигмы для Wi-Fi. Традиционно методы доступа к каналу запрещали соседним устройствам получать доступ к каналу во время передачи. Эта парадигма была реализована в механизме RTS/CTS (англ.: Request-to-Send/Clear-to-Send) первого стандарта Wi-Fi, в МССА (англ.: Mesh coordination function Coordinated Channel Access) [2] 802.11s, определяющий многошаговые сети Wi-Fi, НССА ТХОП (англ.: Hybrid coordination function Coordinated Channel Access Transmission Opportunity), описанного в 802.11aa [3], структуре бикон-интервала 802.11ad/ay. Разработчики IEEE 802.11 рассматривали аналогичные подходы в начале процесса создания 802.11ax. Однако большинство утвержденных механизмов повторного пространственного использования радиочастот в Wi-Fi 6 работают наоборот: они разрешают новую

передачу во время текущей, если новая не может повредить текущую. Новые механизмы повторного пространственного использования радиочастот в сетях Wi-Fi 6, например, OBSS PD (англ.: Overlapped Basic Service Set Power Detection), разрешают начинать новую передачу во время текущей, если новая передача происходит с малой мощностью. Снижение мощности уменьшает интерференцию для текущих передач, но одновременно требует более низкоскоростных сигнально-кодовых конструкций (СКК) для новых.

Многие исследования по повторному пространственному использованию радиочастот слишком сильно упрощают моделирование, что приводит к неправильным результатам. Например, некоторые работы игнорируют алгоритмы выбора СКК [4–14]. В то же время, с использованием среды имитационного моделирования ns-3 было показано [15, 16], что совместная работа OBSS PD и широко распространенного алгоритма управления скоростью Minstrel дает нулевые или отрицательные приросты пропускной способности. Для решения этой проблемы был предложен новый алгоритм выбора СКК, специально разработанный для работы с OBSS PD [15].

В данной работе показаны некоторые особенности использования механизма OBSS PD, которые существенно влияют на производительность сетей Wi-Fi.

Оставшаяся часть статьи организована следующим образом. В разделе 2 описаны основные механизмы сетей Wi-Fi, в том числе и механизмы повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов. В разделе 3 обсуждаются важные детали реализации OBSS PD, которые необходимы для обеспечения правильной работы и повышения производительности, но не определены стандартом. Раздел 4 содержит выводы и направления дальнейшей работы.

2. ДОСТУП К КАНАЛУ В СЕТЯХ WI-FI

2.1. Основной метод доступа к каналу

Современные сети Wi-Fi используют метод случайного доступа к каналу, называемый EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access). EDCA основан на CSMA/CA (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) и работает следующим образом. Перед началом каждой передачи станция Wi-Fi, инициализирует целочисленный счетчик отсрочки случайным числом. Когда канал простаивает в течение интервала времени, называемого слотом отсрочки, станция уменьшает счетчик отсрочки на единицу. Если канал занят, станция приостанавливает отсчет отсрочки. Она возобновляет отсчет отсрочки, когда канал снова становится свободным, по крайней мере, в течение интервала времени AIFS (англ.: Arbitration Interframe Space), когда счетчик отсрочки становится нулевым, станция может осуществлять передачу последовательности кадров в течение некоторого времени, ограниченного порогом TXOP Limit (англ.: Transmission Opportunity).

В сетях Wi-Fi станции поддерживают как физическое, так и виртуальное определение занятости канала.

Станция считает канал занятым физически, если она либо передает, либо принимает сигнал, мощность которого превышает некоторый порог. В частности, канал занят, если станция получает сигнал Wi-Fi, мощность которого превышает порог PD (англ.: Packet Detect). В сетях Wi-Fi предыдущих поколений этот порог равен -82 дБм для канала 20 МГц. Начиная с 802.11ax, благодаря механизму OBSS PD станции могут адаптивно увеличивать его, уменьшая мощность следующей передачи.

Порога PD недостаточно для определения несущей. Интерферирующий сигнал может принадлежать устройствам другой технологии. Если сигнал не может быть декодирован как преамбула пакета Wi-Fi, применяется другой гораздо более высокий порог ED (англ.: Energy Detect). По стандарту этот порог равен -62 дБм.

Помимо физической занятости, канал может быть занят виртуально. Для этого Wi-Fi использует механизм, называемый NAV (англ.: Network Allocation Vector), который работает следующим образом. Почти все кадры Wi-Fi содержат поле Duration, в котором указано время, отсчитываемое от конца этого кадра, которое канал будет занят виртуально, т. е. до окончания передачи пакетов. Например, поле Duration кадра данных включает длительность кадров подтверждения (англ.: ACK) или блочного подтверждения (англ.: BlockAck), которые обычно передаются в ответ на кадры данных. То же поле используется в механизме RTS/CTS¹. Обратим внимание: чтобы получить значение поля Duration, станция должна успешно декодировать весь кадр. Поскольку на станцию может приходиться пакет с большим затуханием, чем на адресат этого пакета, выбранная СКК может быть слишком высокоскоростной, чтобы обеспечить корректное декодирование. Если кадр декодирован неправильно, поле Duration невозможно прочитать и NAV не работает. Однако, чтобы защитить кадры ACK от коллизий, стандарт разрешает отсчет отсрочки станциям, которые неправильно декодировали кадр, не через AIFS, а через увеличенный интервал времени, равный AIFS плюс время, необходимое для передачи ACK на минимальной СКК.

2.2. Улучшения IEEE 802.11ax для виртуальной занятости канала

Стандарт IEEE 802.11ax определяет несколько механизмов для улучшения определения виртуальной занятости канала в плотных сетях.

Во-первых, чтобы повысить надежность NAV, 802.11ax позволяет передающим станциям указывать оставшуюся длительность времени, когда канал будет занят, в поле HE-SIG-A заголовка физического уровня, передаваемого на наиболее надежной СКК.

Во-вторых, в устаревших сетях канал считается занятым, если станция получает кадр с ненулевым значением поля Duration, независимо от того, к какой сети принадлежит кадр. Кроме того, станция сбрасывает свой NAV, если она получает кадр CF-End независимо от источника этого кадра. Такой общий NAV может привести к нежелательной работе в плотных сетях, когда станция откладывает свою передачу после получения из соседней сети кадра на малой мощности, который устанавливает NAV. Более того, станция сбрасывает NAV, выставленный кадрами из своей сети, когда она получает CF-End из соседней сети.

Чтобы различать кадры из своей и чужих сетей без необходимости их полного декодирования, 802.11ax использует 6-битный цвет сети, следуя аналогичному подходу сетей Wi-Fi HaLow [17]. Цвет сети — это псевдоуникальный идентификатор сети, выбранный точкой доступа с целью избежать конфликтов цветов с соседними точками доступа. Цвет сети указывается в поле HE-SIG-A заголовка физического уровня кадра. Обратим внимание, что устаревшие кадры не содержат этого поля. Цвет сети используется механизмами повторного пространственного использования радиочастот, поскольку он позволяет легко различать кадры, отправленные из своей и чужой сети.

Например, цвет сети используется для поддержки двух механизмов NAV. До появления 802.11ax станции поддерживали единый NAV, также называемый базовым NAV, в то время как стандарт 802.11ax ввел дополнительный NAV, относящийся только к кадрам собственной сети. Канал считается занятым, если какой-либо из NAV сигнализирует, что он занят.

Если полученный кадр распознается как кадр своей сети, станция обновляет только дополнительный NAV. В противном случае станция обновляет базовый NAV. Аналогично, при получении CF-End обновляется только соответствующий NAV.

¹ RTS и CTS — это короткие кадры, отправляемые передатчиком и получателем соответственно перед длинными передачами, чтобы уменьшить продолжительность коллизий и защитить передачи от коллизий со скрытыми станциями.

Поддержание двух NAV гарантирует, что если передачи двух последовательностей кадров в собственной и чужой сети перекрываются, NAV по-прежнему защищает одну передачу после завершения другой. Обратим внимание, что этот механизм не различает передачи в нескольких чужих сетях. Изначально разработчиками IEEE 802.11ax рассматривалось несколько (более 2) NAV, но разработчики решили сохранить только два, чтобы уменьшить сложность реализации механизма [18]. Обратным эффектом этого упрощения является то, что станция не может точно отслеживать базовый NAV, если она видит кадры из двух соседних сетей.

2.3. Повторное пространственное использование радиочастотных ресурсов в сетях IEEE 802.11ax

В беспроводных сетях повторное пространственное использование радиочастотных ресурсов в сетях IEEE 802.11ax изначально изучалось в контексте многошаговых сетей. Многошаговые сети Wi-Fi были стандартизированы в дополнении IEEE 802.11s в 2011 году. Основными средствами улучшения повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов в сетях Wi-Fi на тот момент были управление мощностью передачи (англ. Transmission Power Control) и планирование [19, 20]. Другими словами, станции могут составлять некоторое расписание и регулировать мощность передачи в каждом интервале времени, скажем, чтобы минимизировать помехи или максимизировать пропускную способность. Хотя такие схемы не получили широкого распространения, аналогичный подход можно применить в плотных сетях [21]. Однако для этого требуется, чтобы точки доступа координировали свои расписания.

Другим направлением является настройка порогов занятости [22]. Такой метод, называемый динамическим контролем чувствительности (англ.: Dynamic Sensitivity Control, DSC), был предложен для включения в 802.11ax [23, 24]. При использовании DSC точка доступа или станция измеряет мощность полученных биконов, вычисляет скользящее среднее значение мощности и периодически обновляет свой порог занятости канала как среднее значение мощности полученных биконов минус некоторый запас. Хотя в некоторых исследованиях показаны многообещающие результаты различных модификаций DSC [25, 26], этот метод не был включен в стандарт, поскольку не может обеспечить справедливое распределение ресурсов в сценариях, рассматриваемых разработчиками 802.11ax [27].

В частности, как показано в [28], если какая-либо станция уменьшает свою мощность передачи или увеличивает порог PD независимо от соседних станций, это приводит к несправедливости, и может многократно снизить пропускную способность, например, когда одна станция откладывает свои передачи, в то время, как ее сосед передает, но не наоборот. Авторы [28] показывают, что эту проблему можно смягчить путем совместной настройки порога PD и мощности передачи таким образом, чтобы произведение PD и мощности передачи оставалось постоянным. Это правило было предложено ранее для другой задачи [29]. Иными словами, порог PD и мощность передачи должны быть обратно пропорциональны для всех станций сети, что в литературе часто называют IPS (англ.: Inversely Proportional Setting).

В зависимости от реализации IPS может как решать вышеописанную проблему асимметричных соединений, так и приводить к появлению таких соединений. В частности, такие соединения могут возникать, когда одна станция, передающая с низкой мощностью, видит передачи второй станции на высокой мощности и снижает мощность своих передач, но вторая станция игнорирует передачи первой станции из-за низкой мощности. В результате вторая станция постоянно воспринимает канал как свободный и все время передает на высокой мощности, а первая станция вынуждена постоянно передавать на низкой мощности. Как следствие, снижается скорость передачи данных второй станции.

Эта проблема в плотных сетях не может быть решена без координации между точками доступа. Особенно критично она проявляется в сценарии, где одна сеть расположена между

двумя другими, устройства которых не видят друг друга [30]. В этом сценарии сеть, расположенная посередине может инициировать передачу на высокой мощности только тогда, когда ни в одной из соседних сетей не осуществляется передача, как показано на рис. 1. Чтобы это произошло, эти сети должны завершить свои передачи практически одновременно, но это случается редко, поскольку они не видят передачи друг друга и работают асинхронно.

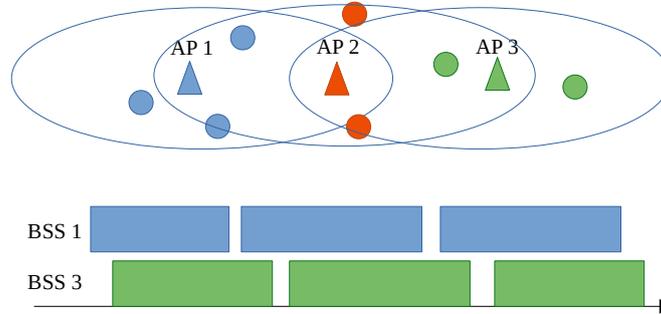


Рис. 1. Сценарий неравномерного распределения пропускных способностей

Производительность IPS подробно изучалась в серии работ с использованием методов стохастической геометрии [31–34]. В [32, 34] авторы получили оптимальное смещение обратно пропорциональной настройки (насколько мощность и порог занятости канала должны быть уменьшены/увеличены соответственно) в зависимости от ожидаемого числа соседей и отношения сигнал/шум. В [33] авторы исследовали производительность сетей, когда точки доступа изменяют мощность передачи и порог занятости обратно пропорционально, учитывая среднюю мощность сигналов, принимаемых от станции, с которой они обмениваются данными. Однако в этой статье СКК считается фиксированной, поэтому пропускная способность определяется как количество передач с отношением сигнал/шум выше порога (например, 10 дБ).

Основываясь на результатах различных исследований, после длительного обсуждения разработчики IEEE 802.11ax пришли к соглашению о двух независимых механизмах повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов: OBSS PD и PSR.

OBSS PD представляет собой общий механизм повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов, подходящий как для передачи к точке доступа, так и от нее.

Механизм OBSS PD вводит новый порог OBSS_PD, который обычно выше значения PD по умолчанию на x дБ и всегда ниже порога ED. Станция может использовать OBSS_PD вместо порога PD по умолчанию при отсчете отсечки, если она обнаруживает передачу из чужой сети, идентифицируя чужую сеть, например, по цвету. Иными словами, если цвет в заголовке принятого кадра отличается от ее собственного цвета, заголовок кадра не запрещает операцию пространственного повторного использования, а полученная мощность ниже порога OBSS_PD, станция может прекратить прием этого кадра. Однако в этом случае она должна уменьшить мощность передачи на те же x дБ при запуске следующей передачи. На рис. 2 показаны допустимые комбинации значений мощности передачи и порогов OBSS_PD. Обратите внимание, что ниже традиционного порога PD, равного -82 дБм, мощность передачи не ограничивается механизмом OBSS PD.

При использовании OBSS PD каждая станция может выбрать значение x независимо от других станций, но в соответствии с правилом IPS. Точный алгоритм выбора порога OBSS_PD стандартом не указан и предлагались различные подходы, в том числе на основе федеративного обучения [35].

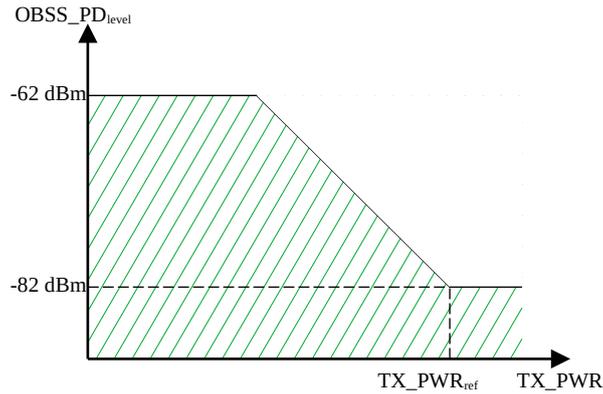


Рис. 2. Разрешенные значения мощности передачи и порога OBSS_PD

Отметим, что согласно стандарту пониженная мощность должна использоваться только до тех пор, пока станция не завершит передачу последовательности кадров и не взведет счетчик отсрочки².

Чтобы улучшить работу OBSS PD с несколькими соседними сетями, 802.11ax вводит группы SRG (англ.: Spatial Reuse Groups). Каждая группа SRG может включать несколько сетей. Точкам доступа предварительно сообщается список цветов сетей, назначенных их группе SRG. Станция, принадлежащая некоторой группе SRG, может начать свою передачу во время чужой передачи, если чужая передача принадлежит той же группе SRG и уровень принимаемого сигнала ниже соответствующего значения SRG OBSS_PD. Остальные правила аналогичны описанным выше правилам OBSS PD.

Группирование сетей в группы SRG гарантирует, что станции, принадлежащие разным SRG, не будут использовать одни и те же частотно-временные ресурсы для передачи. Например, группы SRG можно использовать для предотвращения помех друг другу со стороны сетей, принадлежащих разным сетевым операторам. Однако стандарт не содержит рекомендаций по настройке групп SRG, и в литературе крайне мало исследований, оценивающих эффективность этого механизма. Хотя группы SRG обеспечивает координацию пространственного повторного использования между различными сетями, пороги чувствительности и мощность передачи контролируются каждой станцией независимо.

Механизм параметризованного повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов PSR (англ.: Parameterized Spatial Reuse) обеспечивает централизованную координацию мощности и порогов занятости, но этот механизм подходит только для передач к точке доступа, которые начинаются с триггер-кадра, отправленного точкой доступа [36]. В триггер-кадре точка доступа указывает такие параметры следующих передач к точке доступа, как мощность передачи, СКК, ресурсный блок, количество пространственных потоков и т. д. При использовании PSR точка доступа указывает в кадре триггера разрешенные помехи от других станций [37]. Когда станция получает триггер-кадр, отправленный чужой точкой доступа, она может начать свою собственную передачу параллельно с существующей передачей к точке доступа, если новая передача не вызывает помех, превышающих разрешенный уровень.

² Станция может иметь несколько текущих периодов ограничения мощности передачи OBSS PD, которые перекрываются во времени. В этом случае она должно использовать наиболее значительное ограничение мощности.

В частности, пусть точка доступа разделила весь канал на подканалы по 20 МГц. Для каждого подканала она определяет сумму $S = T + I$ своей мощности передачи T и допустимых помех I и передает это значение в триггер-кадре. Станция получает триггер-кадр мощности $R = T + L$, где $L < 0$ — это затухание в канале. Каждая станция вычисляет максимально допустимую мощность передачи как $I - L = S - R$. Эта формула гарантирует, что принимаемый точкой доступа мешающий сигнал не превышает I , при условии, что потери на пути одинаковы в обоих направлениях между точкой доступа и станцией.

Существенным недостатком этого подхода является его применимость только для передачи к точке доступа, тогда как в сетях Wi-Fi, как правило, основная часть данных передается от точки доступа клиентским станциям. По этой причине основное применение PSR — это уменьшение задержки в приложениях реального времени, например, в приложениях дополненной реальности [37]. Исследователи также изучают дальнейшие улучшения этой схемы, например, благодаря координированному управлению диаграммой направленности клиентских станций [38].

2.4. Координированный метод повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов как потенциальное нововведение технологии Wi-Fi 8

Одним из планируемых нововведений технологии Wi-Fi 8, также известный как IEEE 802.11bn, является координация нескольких точек доступа, которая включает в себя координированный метод повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов, координированный метод OFDMA, координированное формирование диаграммы направленности и распределенный MU-MIMO. Хотя распределенный MU-MIMO может оказаться слишком сложным для дешевых и простых устройств Wi-Fi, координированный метод повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов (англ.: Coordinated Spatial Reuse, CSR) кажется достаточно простым, чтобы его можно было включить в будущие версии стандарта Wi-Fi [39].

CSR не требует какого-либо специального координирующего устройства или выделенного канала управления. Идея скоординированного повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов заключается в сборе измерений по радиоканалу и передачи параметров канала соседней точке доступа, которой разрешено повторно использовать радиоресурсы.

При использовании CSR первая точка доступа, отсчитав отсрочку, может запустить передачу последовательности кадров, при этом часть кадров могут передаваться устройствами соседних сетей. Сначала первая точка доступа получает с других точек доступа измерения уровня сигнала, передаваемого станциями [40]. Используя эту информацию, первая точка доступа оценивает помехи на связанных с ней станциях и вычисляет такие параметры передачи (пропускная способность, продолжительность, мощность передачи) для остальных точек доступа, которые гарантируют, что уровень помех на станциях будет приемлемым. Отправив рассчитанные параметры, первая точка доступа начинает собственную передачу. В остальных сетях передачи могут начаться, только если они не повредят текущей передаче первой точки доступа.

Точные детали протокола CSR еще не определены, а эффективный с точки зрения вычислений алгоритм планирования, который может выбирать как станции или точку доступа, так и параметры передачи, еще предстоит разработать [41]. Однако CSR является многообещающим решением упомянутой выше проблемы резкого снижения пропускной способности из-за соседних сетей. В то же время его эффективность существенно зависит от протокола, который точки доступа используют для координации своих передач, и накладных расходов, вызываемых этим протоколом. Поскольку принятого протокола CSR нет, то понятно, что изучение ограничений механизма OBSS PD будет полезно разработчикам Wi-Fi 8.

3. АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ OBSS PD

Анализ метода OBSS PD повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов, описанного в стандарте IEEE 802.11ax позволяет сделать следующие выводы.

Как описано в разделе 2.1, занятость канала зависит от значений порогов PD и ED, равных -82 дБм и -62 дБм соответственно. Чтобы использовать порог PD, станция должна получить корректную преамбулу кадра. Если преамбула потеряна, например, из-за коллизий, станция считает канал незанятым, когда мощность принимаемых станцией кадров, попавших в коллизию, ниже порога ED.

Другими словами, пока все станции синхронно отсчитывают отсрочку и могут обнаружить преамбулу передачи друг друга, используется порог PD, и значение порога ED не имеет значения. Однако если синхронизация потеряна и одна станция не обнаруживает передачу другого устройства, станция откладывает свою передачу только в том случае, если мощность принимаемого сигнала от другой станции превышает порог ED. Это наводит нас на

Вывод 1: *В условиях плотного развертывания пересечение передач станций из соседних сетей может привести к потере контроля занятости канала из-за переключения на высокий порог ED вместо ожидаемого порога PD.*

Синхронизация может быть потеряна по разным причинам, например, из-за замирания, снижающего принимаемую мощность ниже порога PD на короткое время, или из-за коллизии.

Пусть в случае коллизии две станции одновременно завершают отсрочку и начинают передачи разной длительности. Пусть первая станция завершает передачу раньше второй и начнет прослушивать канал. Если мощность сигнала от второй станции на первой ниже порога ED, например, -62 дБм, станция проигнорирует передачу и начнет новый отсчет отсрочки³. Более того, если станция начинает передачу, приемник может испытывать сильные помехи для правильного декодирования передачи из-за окончания длинной передачи. Кроме того, как показано в [42], если получатель принял преамбулу длинного кадра, он может не заметить новый кадр.

Вывод 2: *Если станция начинает передачу после коллизии или после окончания одной из нескольких накладывающихся по времени передач, то она должна учитывать возможность других передач в канале.*

Чтобы механизм OBSS PD работал, станции должны обнаруживать преамбулу передач OBSS, т. е. они должны быть синхронизированы. Только в этом случае станция, обнаруживающая передачу OBSS, может снизить свою мощность передачи. Если синхронизация потеряна, станции в соседних сетях будут передавать одновременно, но с использованием самой высокой мощности передачи.

Проблема в том, что сам механизм OBSS PD приводит к потере синхронизации. На рисунке 3 показан случай, когда синхронизация потеряна из-за OBSS PD. В этом сценарии станции двух соседних сетей принимают передачи друг друга на мощности выше -82 дБм, но ниже -62 дБм при обычной мощности передачи.

Вначале передача с пониженной мощностью запускается в сети 2 одновременно с передачей в сети 1. Когда точка доступа в сети 1 завершает передачу, она не может обнаружить передачу в сети 2, поэтому начинает новую передачу, предполагая, что канал свободен. Затем точка доступа в сети 2 завершает передачу, также обнаруживает, что канал свободен, и начинает следующую передачу с мощностью передачи по умолчанию. После этого обе сети долгое время работают асинхронно, пока у них есть данные на передачу и они не синхронизируются из-за случайной задержки, вероятность чего крайне мала.

³ Хотя этот эффект очевиден для многих исследователей, проводящих исследования в области Wi-Fi, его часто игнорируют в моделях и простых имитационных моделях.

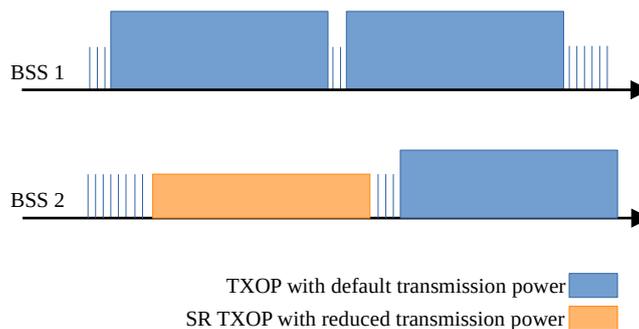


Рис. 3. Потеря синхронизации из-за механизма OBSS PD

Вывод 3: Потеря синхронизации позволяет станциям вести передачу с большой мощностью во время текущей передачи, что нарушает ключевую идею механизма OBSS PD.

Стандарт не устанавливает каких-либо дополнительных ограничений на длительность новой передачи последовательности кадров во время текущей передачи кадров, поэтому продолжительность новой передачи подчиняется тем же правилам, что и обычной.

Если станция начинает короткую передачу последовательности кадров с пониженной мощностью, она может передать следующие кадры с большей мощностью, см. рис. 4. По этой причине отправка коротких последовательностей кадров с помощью OBSS PD будет полезна для станций. Однако это может повредить окончание текущей передачи, так как станция, завершившая свою новую передачу, более не должна снижать мощность.

Также длительность новой передачи не должна превышать длительность исходной. В противном случае, когда она закончится, канал может быть уже снова занят. Следовательно, новая передача должна завершиться в конце текущей передачи, если, конечно же, станция имеет достаточно данных для этого.

Вывод 4. Станция, которая начинает новую передачу данных во время текущей с помощью механизма OBSS PD, должна завершить эту передачу примерно в то же время, когда завершится и текущая передача, если у этой станции достаточно данных.

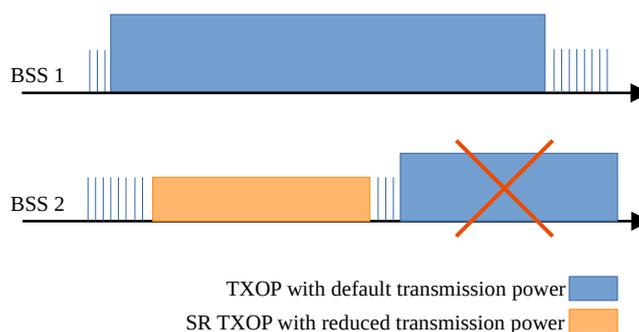


Рис. 4. Новая передача последовательности кадров короче, чем текущая.

Правила EDCA динамически настраивают конкурентное окно таким образом, чтобы количество потерянных пакетов из-за конфликтов между станциями, конкурирующими за канал, было сведено к минимуму без значительных накладных расходов на отсрочку передачи дан-

ных. Эти правила хорошо работают, только когда число конкурирующих устройств остается примерно постоянным.

При использовании механизма OBSS PD передачи в свободном канале и параллельно с уже идущей передачей, происходят принципиально в разных условиях: разное количество конкурирующих станций, ниже мощность передачи, другая СКК. Таким образом, статистика успешных и неудачных передач при ограниченной мощности передачи не должна влиять на параметры передачи с нормальной мощностью.

Вывод 5. Статистика успешных и неудачных передач при сниженной мощности не должна влиять на отсрочку или СКК на нормальной мощности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения эффективности работы плотных сетей полезны механизмы повторного пространственного использования радиочастотных ресурсов. В работе анализируются потенциальные проблемы при использовании нового механизма OBSS PD в плотных сетях Wi-Fi и составлены рекомендации по настройке этого механизма.

В дальнейшей работе, планируется исследовать численно прирост производительности благодаря соблюдению этих рекомендаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, "A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, 2019.
2. E. Khorov, A. Krasilov, A. Krotov, and A. Lyakhov, "Will MCCA revive wireless multihop networks?," *Computer Communications*, vol. 104, pp. 159–174, 2017.
3. E. Khorov, A. Lyakhov, A. Ivanov, and I. F. Akyildiz, "Modeling of real-time multimedia streaming in Wi-Fi networks with periodic reservations," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 55633–55653, 2020.
4. I. Selinis, K. Katsaros, S. Vahid, and R. Tafazolli, "Control OBSS/PD sensitivity threshold for IEEE 802.11 ax BSS color," in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–7, IEEE, 2018.
5. F. Wilhelmi, S. Barrachina-Muñoz, and B. Bellalta, "On the performance of the spatial reuse operation in IEEE 802.11 ax WLANs," in *2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pp. 1–6, IEEE, 2019.
6. Y. Kim, G. Kim, T. Kim, and W. Choi, "Transmission opportunity-based distributed obss/pd determination method in IEEE 802.11ax networks," in *2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIC)*, pp. 469–471, IEEE, 2020.
7. T. Ropitault and N. Golmie, "ETP algorithm: Increasing spatial reuse in wireless lans dense environment using ETX," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–7, IEEE, 2017.
8. N. Šepić, E. Kočan, and M. Pejanović-Djurišić, "Evaluating spatial reuse in 802.11 ax networks with interference threshold adjustment," in *2020 24th International Conference on Information Technology (IT)*, pp. 1–4, IEEE, 2020.
9. I. Selinis, K. Katsaros, S. Vahid, and R. Tafazolli, "Exploiting the capture effect on DSC and BSS color in dense IEEE 802.11 ax deployments," in *Proceedings of the Workshop on ns-3*, pp. 47–54, 2017.
10. Y. Wen, H. Fujita, and D. Kimura, "Throughput-aware dynamic sensitivity control algorithm for next generation wlan system," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–7, IEEE, 2017.
11. A. Aijaz and P. Kulkarni, "On performance evaluation of dynamic sensitivity control techniques in next-generation wlans," *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 1324–1327, 2018.

12. S. Barrachina-Muñoz, F. Wilhelmi, I. Selinis, and B. Bellalta, “Komondor: a wireless network simulator for next-generation high-density WLANs,” in *2019 Wireless Days (WD)*, pp. 1–8, IEEE, 2019.
13. A. Valkanis, A. Iossifides, P. Chatzimisios, M. Angelopoulos, and V. Katos, “IEEE 802.11 ax spatial reuse improvement: An interference-based channel-access algorithm,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 2, pp. 78–84, 2019.
14. H. Kim and J. So, “Improving spatial reuse of wireless lan uplink using bss color and proximity information,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 22, p. 11074, 2021.
15. A. Krotov, A. Kiryanov, and E. Khorov, “Rate control with spatial reuse for wi-fi 6 dense deployments,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 168898–168909, 2020.
16. H. Lee, H.-S. Kim, and S. Bahk, “Lsr: Link-aware spatial reuse in ieee 802.11 ax wlans,” in *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1–6, IEEE, 2021.
17. E. Khorov, A. Lyakhov, A. Krotov, and A. Guschin, “A survey on ieee 802.11 ah: An enabling networking technology for smart cities,” *Computer communications*, vol. 58, pp. 53–69, 2015.
18. S. Schelstraete, “Multiple navs for spatial reuse.”
19. K. Hedayati and I. Rubin, “A robust distributive approach to adaptive power and adaptive rate link scheduling in wireless mesh networks,” *IEEE transactions on wireless communications*, vol. 11, no. 1, pp. 275–283, 2011.
20. S. Chattopadhyay, S. Chakraborty, and S. Nandi, “Leveraging the trade-off between spatial reuse and channel contention in wireless mesh networks,” in *2016 8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, pp. 1–8, IEEE, 2016.
21. E. Khorov, A. Kiryanov, and A. Krotov, “Joint power control and time division to improve spectral efficiency in dense wi-fi networks,” in *2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pp. 1–5, IEEE, 2018.
22. J. Zhu, B. Metzler, X. Guo, and Y. Liu, “Adaptive csma for scalable network capacity in high-density wlan: A hardware prototyping approach,” in *Infocom*, vol. 25, pp. 1–10, 2006.
23. M. S. Afaqui, E. Garcia-Villegas, E. Lopez-Aguilera, G. Smith, and D. Camps, “Evaluation of dynamic sensitivity control algorithm for ieee 802.11 ax,” in *2015 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*, pp. 1060–1065, IEEE, 2015.
24. M. S. Afaqui, E. Garcia-Villegas, E. Lopez-Aguilera, and D. Camps-Mur, “Dynamic sensitivity control of access points for ieee 802.11 ax,” in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–7, IEEE, 2016.
25. P. Kulkarni and F. Cao, “Taming the densification challenge in next generation wireless lans: An investigation into the use of dynamic sensitivity control,” in *2015 IEEE 11th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp. 860–867, IEEE, 2015.
26. P. Kulkarni and F. Cao, “Dynamic sensitivity control to improve spatial reuse in dense wireless lans,” in *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp. 323–329, 2016.
27. Z. Zhong, F. Cao, P. Kulkarni, and Z. Fan, “Promise and perils of dynamic sensitivity control in ieee 802.11 ax wlans,” in *2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp. 439–444, IEEE, 2016.
28. V. P. Mhatre, K. Papagiannaki, and F. Baccelli, “Interference mitigation through power control in high density 802.11 wlans,” in *IEEE INFOCOM 2007-26th IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 535–543, IEEE, 2007.
29. J. Fuemmeler, N. H. Vaidya, and V. V. Veeravalli, “Selecting transmit powers and carrier sense thresholds for csma protocols,” *University of Illinois at Urbana-Champaign Technical Report*, 2004.
30. P. Gallo, K. Kosek-Szott, S. Szott, and I. Tinnirello, “Cadwan: A control architecture for dense wifi access networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 1, pp. 194–201, 2018.

31. K. Yamamoto and H. Abeysekera, “Stochastic geometry analysis of inversely proportional setting of transmission power and carrier sense threshold in w lans–optimal threshold in poisson networks,” *IEICE Technical Report; IEICE Tech. Rep.*, vol. 116, no. 149, pp. 103–107, 2016.
32. K. Yamamoto, X. Yang, T. Nishio, M. Morikura, and H. Abeysekera, “Analysis of inversely proportional carrier sense threshold and transmission power setting,” in *2017 14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pp. 13–18, IEEE, 2017.
33. M. Iwata, K. Yamamoto, B. Yin, T. Nishio, M. Morikura, and H. Abeysekera, “Analysis of inversely proportional carrier sense threshold and transmission power setting based on received power for ieee 802.11 ax,” in *2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pp. 1–6, IEEE, 2019.
34. K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, and H. Abeysekera, “Stochastic geometry analysis of inversely proportional carrier sense threshold and transmission power for wlan spatial reuse,” *IEICE Transactions on Communications*, p. 2020EBT0009, 2021.
35. F. Wilhelmi, J. Hribar, S. F. Yilmaz, E. Ozfatura, K. Ozfatura, O. Yildiz, D. Gündüz, H. Chen, X. Ye, L. You, *et al.*, “Federated spatial reuse optimization in next-generation decentralized ieee 802.11 w lans,” *arXiv preprint arXiv:2203.10472*, 2022.
36. K. Chemrov, D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov, “Support of real-time applications in wi-fi 8 with multi-ap coordinated parameterized spatial reuse,” in *2023 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pp. 226–231, 2023.
37. E. de Carvalho Rodrigues, A. Garcia-Rodriguez, L. G. Giordano, and G. Geraci, “On the latency of ieee 802.11 ax w lans with parameterized spatial reuse,” in *GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference*, pp. 1–6, IEEE, 2020.
38. A. Garcia-Rodriguez, D. Lopez-Perez, L. Galati-Giordano, and G. Geraci, “Ieee 802.11 be: Wi-fi 7 strikes back,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 4, pp. 102–108, 2021.
39. S. Park, “Coordinated spatial reuse procedure.”
40. Y. Seok, “Coordinated spatial reuse protocol.”
41. D. Nunez, F. Wilhelmi, S. Avallone, M. Smith, and B. Bellalta, “Txop sharing with coordinated spatial reuse in multi-ap cooperative ieee 802.11 be w lans,” in *2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pp. 864–870, IEEE, 2022.
42. E. Khorov, A. Kureev, I. Levitsky, and A. Lyakhov, “Testbed to study the capture effect: Can we rely on this effect in modern wi-fi networks,” in *2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pp. 1–5, 2018.

Analysis of Spatial Reuse in Wi-Fi 6 Networks

E.M. Khorov, A.V. Krotov

To effectively operate in high-density Wi-Fi networks, the IEEE 802.11 standard describes several mechanisms that improve the spatial reuse. However, the standard does not specify how to use these mechanisms. Moreover, it does not take into account how these mechanisms interact with other important Wi-Fi mechanisms. Unfortunately, ignoring this important aspect results in almost zero benefit from new mechanisms. This article analyzes this problem and proposes some rules that should improve the performance of Wi-Fi 6 networks with enabled spatial reuse.

KEYWORDS: Multi-link, simultaneous transmission and reception, Wi-Fi 7, NS 3, duplicates.