

## Исследование алгоритмов выбора ширины канала с возможностью пропуска подканалов в сетях IEEE 802.11ax и IEEE 802.11be<sup>1</sup>

И.А. Левицкий\*, А.А. Третьяков\*,\*\*, Е.М. Хоров\*

\*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва

\*\*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Москва

Поступила в редколлегию 04.09.2021

**Аннотация**—Новейшее поколение технологии беспроводных локальных сетей IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) призвано повысить эффективность использования канальных ресурсов. Выбор ширины канала с возможностью пропуска подканалов, который появился в Wi-Fi 6, является одним из механизмов, позволяющих достичь этой цели. Стандарт IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), разрабатываемый на момент написания статьи, расширяет возможности этого механизма, делая его более гибким. В данной статье изучается эффективность обновленного механизма выбора ширины канала с возможностью пропуска подканалов. Предлагается алгоритм выбора ширины канала с возможностью пропуска подканалов и показано, что его эффективность выше, чем при использовании стандартных правил использования этого механизма.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** IEEE 802.11ax, Wi-Fi 6, IEEE 802.11be, Wi-Fi 7, объединение каналов, пропуск подканалов

**DOI:** 10.53921/18195822\_2021\_21\_4\_253

### 1. ВВЕДЕНИЕ

С развитием технологии Wi-Fi количество устройств связи и плотность их размещения непрерывно возрастают. Вместе с тем растут требования к пропускной способности беспроводных сетей, и эффективность использования канальных ресурсов становится критически важной.

Один из ключевых методов, улучшающих пропускную способность, — объединение каналов (англ.: channel bonding) — впервые был реализован в стандарте IEEE 802.11n, с появлением возможности расширять канал с 20 до 40 МГц. Далее, в стандарте IEEE 802.11ac максимальная ширина канала была увеличена до 160 МГц, что позволило увеличить номинальную скорость передачи в 8 раз по сравнению с использованием 20 МГц. Согласно правилам стандарта IEEE 802.11ac, при каждой передаче беспроводное устройство обязательно задействует свой основной (англ.: primary) канал шириной 20 МГц. Передача в нем разрешается, если мощность интерференции в нем не превышает порог занятости канала  $-62$  дБм и в нем не обнаружен сигнал 802.11 мощностью выше  $-82$  дБм. Для осуществления передачи в объединенном канале большей ширины устройство может подключать соседние вторичные (англ.: secondary) каналы: secondary 20, secondary 40, secondary 80, где число определяет ширину подключаемого канала в МГц. Подключение производится в строгой очередности от узких каналов к широким.

<sup>1</sup> Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда №20-19-00788, <https://rscf.ru/en/project/20-19-00788/>

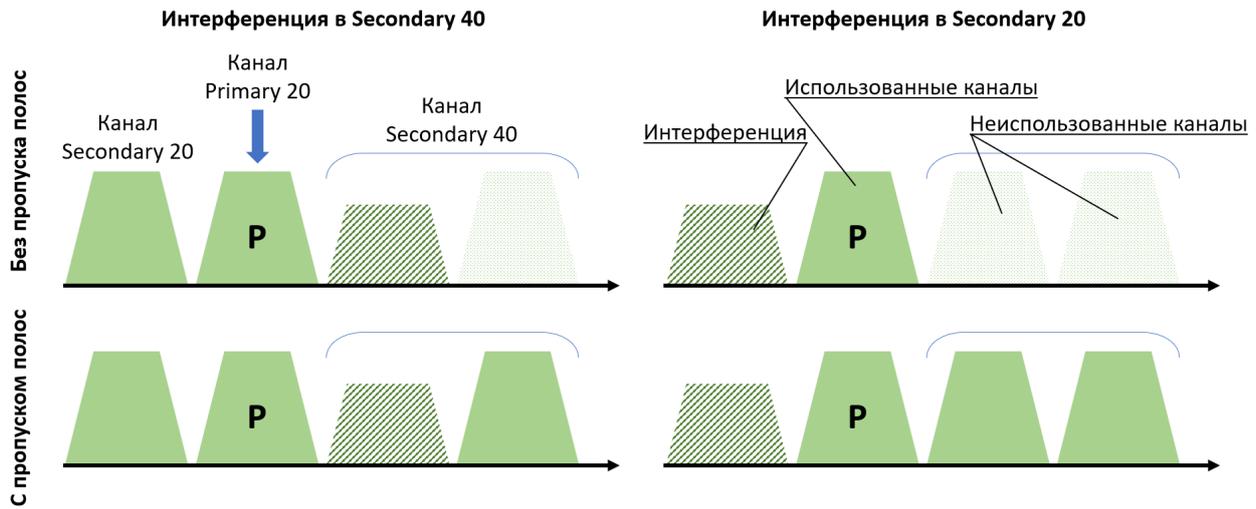


Рис. 1. Принцип работы механизма пропуска подканалов.

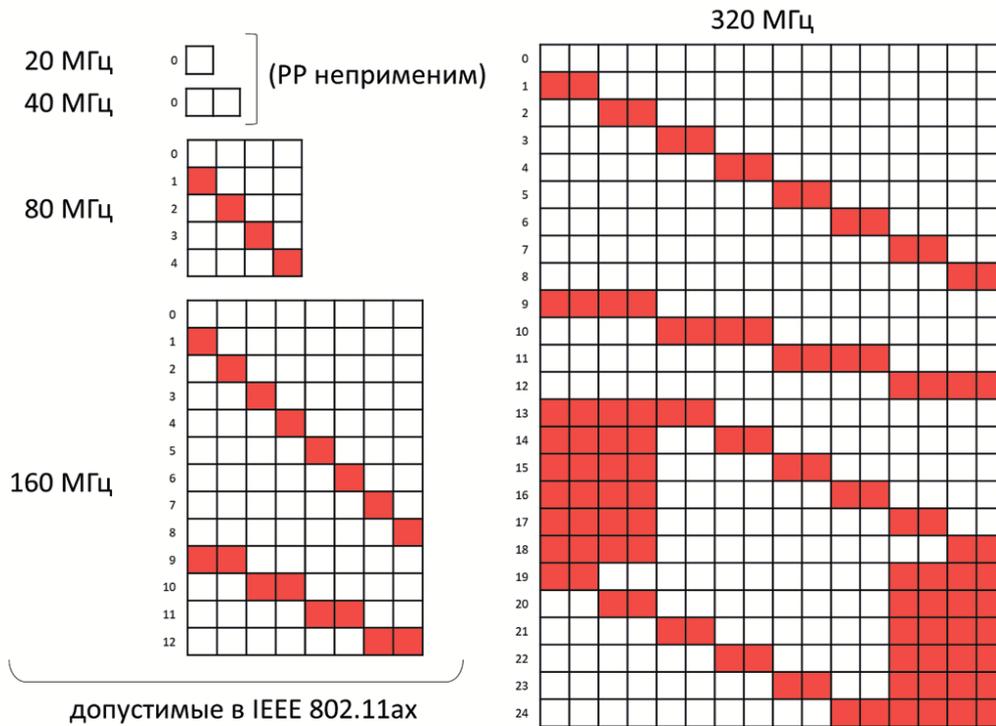
Для подключения следующего вторичного канала проверяется, что мощность интерференции не превышает  $-62$  дБм для secondary 20,  $-59$  дБм для secondary 40 и  $-56$  дБм для secondary 80. В этом канале также не должен быть обнаружен сигнал 802.11 мощностью более  $-72$  дБм с шириной канала 20 МГц или 40 МГц, или сигнал мощностью более  $-69$  дБм с шириной канала 80 МГц.

Однако при работе в широких каналах может наблюдаться высокий уровень интерференции в одном из узких подканалов, что не позволяет использовать соответствующий вторичный канал и все последующие.

Для повышения эффективности использования частотных ресурсов в стандарте IEEE 802.11ax [1] разработан механизм выбора ширины канала с возможностью пропуска подканалов (англ.: preamble puncturing, далее «механизм пропуска подканалов» или «PP»), позволяющий не задействовать при передаче некоторые подканалы для многопользовательских передач с общей шириной канала 80 и 160 МГц. Это позволилократно увеличить пропускную способность в случаях наличия сильной интерференции в узком канале. Например, если в одной сети поддерживается передача с максимальной шириной канала 80 МГц (см. рис. 1), но внутри канала secondary 40 другая сеть ведет передачу сигнала шириной 20 МГц, то по умолчанию первая сеть может работать только в primary 40. С использованием же пропуска подканалов эффективная ширина увеличится на 50%: первая сеть может использовать весь канал 80 МГц, пропустив занятый другой сетью подканал. Аналогично, если вторая сеть передает в secondary 20, то использование PP увеличивает ширину канала в 3 раза, с 20 до 60 МГц.

Стандарт IEEE 802.11ax, однако, позволяет использовать PP только для многопользовательских передач с использованием технологии OFDMA [1]. В стандарте IEEE 802.11be [2, 3] механизм PP стало возможно использовать для однопользовательских передач. Он также был расширен для передач с общей шириной канала 320 МГц.

Рассмотрим допустимые схемы пропуска подканалов для IEEE 802.11ax и IEEE 802.11be. В стандарте IEEE 802.11ax в канале шириной 80 МГц можно пропустить подканал шириной 20 МГц, а в канале шириной 160 МГц — любой один подканал шириной 20 МГц или 40 МГц (см. рис. 2). При пропуске подканала возможно использовать только многопользовательские передачи, поскольку в IEEE 802.11ax не определены ресурсные блоки с пропущенными подканалами.



**Рис. 2.** Список допустимых схем пропуска подканалов в IEEE 802.11ax и IEEE 802.11be (однопользовательские передачи). Пропущенные подканалы закрашены.

В стандарте IEEE 802.11be стало возможным использовать эти схемы пропуска подканалов для однопользовательских передач благодаря новым определенным ресурсным блокам. Кроме того, поскольку IEEE 802.11be разрешил использовать каналы шириной 320 МГц, этот стандарт позволил пропускать любой подканал шириной либо 40 МГц, либо 80 МГц, а также некоторые их комбинации, а именно: если пропущенный подканал 80 МГц находится на краю канала 320 МГц, то можно дополнительно пропустить любой подканал шириной 40 МГц. Описанные схемы изображены на рис. 2.

Стандарт IEEE 802.11be также делает более гибким пропуск подканалов для многопользовательских передач с использованием технологии OFDMA в канале шириной 80 МГц и более. Для таких передач канал делится на блоки по 80 МГц, и в каждом блоке может быть пропущен любой один подканал шириной 20 или 40 МГц.

Отметим, что во всех описанных случаях и в IEEE 802.11ax, и в IEEE 802.11be пропускать подканал, содержащий  $\text{preamble}$  20 запрещено во всех кадрах, кроме кадров, отправленных в восходящем канале по запросу триггер-кадра [2]).

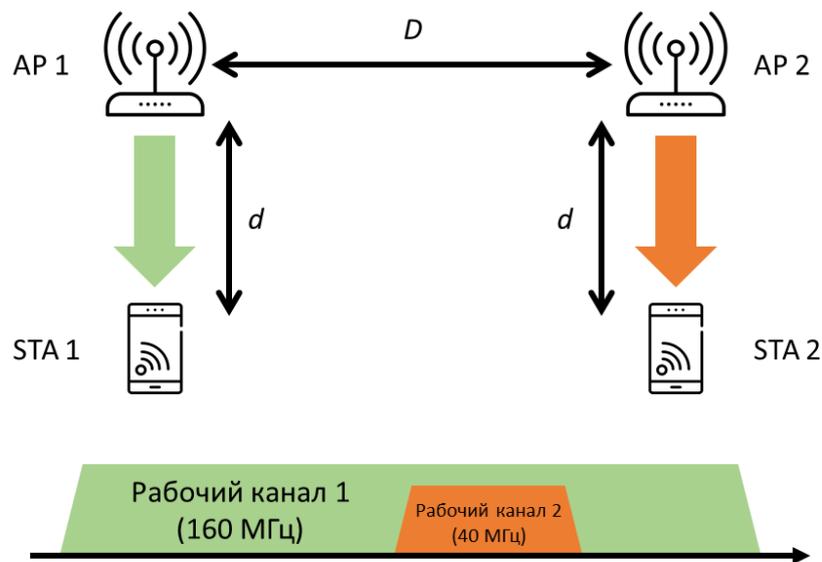
Для принятия решений о выборе используемой ширины канала и схемы пропуска подканалов требуется некоторый алгоритм. Такие алгоритмы не специфицируются в стандарте, однако они необходимы для эффективной работы будущих сетей IEEE 802.11. Именно поэтому выбор алгоритма для управления РР является важной задачей. В работах [4,5] рассматриваются алгоритмы для объединения каналов в сетях IEEE 802.11n и IEEE 802.11ac, которые возможно расширить для использования с возможностью пропуска подканалов. В работах [3,6] описываются механизмы работы и способы применения РР в сетях IEEE 802.11ax и IEEE 802.11be соответственно, но не исследуются конкретные алгоритмы и не показано улучшение эффективности использования ресурсов сети за счет РР. Повышение эффективности за счет использо-

вания РР для однопользовательских передач показано в предложениях [7,8] в рамках группы, разрабатывающей IEEE 802.11be, но требуемые алгоритмы в этих работах не представлены.

В данной работе впервые исследуется метод пропуска подканалов, предложенный для сетей IEEE 802.11be, с описанием и сравнением алгоритмов для управления им. Так как ранее РР не исследовался детально, то не было предложено и алгоритмов для управления этим методом. Предлагается расширить предложенные ранее алгоритмы [4, 5] и адаптировать их для метода пропуска подканалов. В этой работе анализ эффективности алгоритмов будет проводиться в среде имитационного моделирования NS-3 [9]. На момент проведения работы NS-3 не поддерживал механизм РР, поэтому в рамках данной работы этот механизм был реализован. Полученная модель позволяет проводить анализ различных сценариев с разной степенью сложности, получая таким образом любую необходимую информацию для оценки эффективности конкретных алгоритмов.

## 2. РАССМАТРИВАЕМЫЙ СЦЕНАРИЙ

В данной работе рассмотрен сценарий с двумя близко расположенными сетями (см. рис. 3). В каждой сети одна точка доступа передает данные одной присоединенной станции в режиме насыщения. Первая сеть (BSS1) работает по стандарту IEEE 802.11be, поддерживает максимальную ширину канала 160 МГц и РР, вторая (BSS2) поддерживает максимальную ширину канала 40 МГц. При этом канал, в котором работает BSS2, расположен в пределах канала 160 МГц первой сети. Этот сценарий отражает случай обслуживания двух станций разных поколений двумя точками доступа в пределах видимости друг друга.



**Рис. 3.** Рассматриваемый сценарий с двумя сетями, работающими в пересекающихся каналах.

### 2.1. Доступ к каналу

Точки доступа в обеих сетях используют EDCA (англ.: enhanced distributed channel access) в качестве метода доступа к каналу. EDCA реализует множественный доступ с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). Используя метод EDCA, перед каждой попыткой передачи пакета станция

выполняет процедуру случайной отсрочки. Станция запускает счетчик отсрочки, начальное значение которого выбирается случайно из интервала  $[0; W - 1]$ , где  $W$  — размер конкурентного окна. Счетчик отсрочки уменьшается на единицу каждый временной слот длиной 9 мкс, если основной канал primary 20 свободен в течении этого слота. Если канал оказывается занят, станция приостанавливает счетчик отсрочки передачи и возобновляет его, когда канал становится свободным в течении межкадрового пространства AIFS. Когда счетчик отсрочки передачи достигает нуля, станция осуществляет попытку передачи пакета. Если станция получает подтверждение на свою передачу, попытка считается успешной. В случае неуспешной попытки предыдущий размер окна  $W$  удваивается, пока оно не достигнет максимального значения  $W_{max}$ . Значение  $W$  возвращается в минимальное значение  $W_{min}$  при успешной доставке пакета или его отбрасывания. Метод EDCA настраивает различные параметры конкуренции для каждой категории доступа. Чем выше приоритет категории доступа, тем меньше для нее выбираются величины параметров AIFS,  $W_{min}$  и  $W_{max}$ .

Для улучшения эффективности использования канала станции могут применять агрегированные кадры (англ.: Aggregated MAC Protocol Data Unit, A-MPDU). Станция может передавать больше данных в одном агрегированном кадре A-MPDU, затрачивая при этом меньше ресурсов на протокольные издержки по сравнению и передачей отдельных кадров (MPDU). Текущий стандарт 802.11 поддерживает максимальное количество 64 MPDU в одном A-MPDU. Для подтверждения таких A-MPDU получатель отправляет кадр блочного подтверждения (Block Ack), который содержит в себе таблицу об успешности приема MPDU из полученного A-MPDU.

## 2.2. Алгоритмы использования механизма пропуска подканалов

Точка доступа может использовать один из следующих алгоритмов для управления механизмом PP:

1. Constant bandwidth (CB): постоянное использование канала максимальной поддерживаемой ширины. Передача происходит в полном канале, если по истечению счетчика отсрочки канал primary 20 считается свободным.
2. Simple bonding (SB): классический алгоритм объединения каналов IEEE 802.11ac, присоединяющий соседний вторичный канал в случае, если мощность интерференции в нем не превышает порог занятости канала.
3. Max bandwidth (MB): использование канала максимально возможной шириной с пропущенными подканалами, в которых интерференция превышает пороговую, согласно механизму PP. Так, согласно правилам определения занятости для подканалов шириной 20 МГц, установленным в стандарте IEEE 802.11ax, устройства считают подканал шириной 20 МГц занятым, если мощность интерференции в нем превышает  $-62$  дБм, или в нем обнаружена преамбула кадра IEEE 802.11 с мощностью более  $-72$  дБм. Протокольные особенности IEEE 802.11ax позволяют пропускать один из подканалов, не содержащих primary 20: любой, шириной 20 МГц, или 40 МГц при ширине канала передачи 160 МГц. В сетях IEEE 802.11be при передаче с шириной канала 320 МГц можно также пропускать любой подканал шириной 40 МГц или 80 МГц, и если пропущенный канал шириной 80 МГц находится на границе области 320 МГц, то возможно пропустить еще один подканал шириной 40 МГц. Все допустимые схемы пропуска подканалов изображены на рис. 2.
4. Max throughput (MT): использование канала в котором достигается наибольшая пропускная способность  $R$ , с учетом известной мощности интерференции в указанных каналах. Данный алгоритм рассчитывает метрику потенциальной пропускной способности как  $R = r_{20} * BW$ , где  $r_{20}$  — скорость передачи данных с выбранной сигнально-кодовой конструкцией (СКК) в расчете на подканал шириной 20 МГц,  $BW$  — количество используемых подканалов.

Таблица 1. Параметры проведения экспериментов

№ эксперимента	Расстояние между AP и STA	Канал BSS2 по отношению к каналу BSS1
1	15 м	secondary 40
2	15 м	secondary 80
3	30 м	secondary 40
4	30 м	secondary 80

Ширины канала и схемы пропуска подканалов перебираются среди разрешенных правилами определения занятости. Для каждой из них выбирается максимальная СКК, обеспечивающая не более 10% ошибок согласно модели ошибок NIST. Однако для этой модели ошибок требуется информация об отношении сигнал-интерференция-шум (англ.: signal-to-interference-plus-noise, SINR), но вычисленное простым отношением интегральных величин, оно неприменимо. Это связано с тем, что влияние узкополосной интерференции на полезный сигнал отличается от влияния широкополосной интерференции той же суммарной мощности. Поэтому вместо простого SINR предлагается использовать эффективное отношение SINR (англ.: effective SINR), вычисляемое для используемого канала по формуле [10]

$$SINR_{eff} = -\ln \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \exp(-SINR_k) \right),$$

где используемый канал разбит на  $N$  частей (подканалов) равной ширины,  $SINR_k$  — это значение SINR  $k$ -том подканале.

Во всех случаях для вычисления  $SINR_{eff}$  используются данные о канальных условиях на принимающей станции. Важно отметить, что для получения этих условий точке доступа требуется информация о мощности приема сигнала на конечной станции. В используемой модели предполагается, что эта информация доступна на точке доступа в реальном времени. В реальных сетях эта информация может быть получена от станции по обратной связи или оценена самой точкой доступа из известных мощности станции и мощности приема на точке доступа.

В качестве метрики для оценки эффективности алгоритмов использовалась пропускная способность каждой сети.

### 3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Пусть две точки доступа передают данные с мощностью 21 дБм ассоциированным с ними станциям, расположенным на расстоянии 15 м и 30 м от точек доступа. Для передачи всегда используется одинаковая суммарная мощность, вне зависимости от используемой ширины канала и/или пропуска подканалов. Расстояние между точками доступа варьируется для получения уровней интерференции от  $-60$  дБм до  $-96$  дБм в подканалах шириной 20 МГц. Для передачи данных используется метод агрегации MPDU — A-MPDU, при этом один передаваемый кадр A-MPDU состоит из 64 MPDU. Размер одного MPDU составляет 1508 байт. Проводится 4 эксперимента, параметры которых (расстояние между AP и STA, положение канала BSS2 по отношению к каналу BSS1) указаны в таблице 1.

На рис. 4–7 изображена зависимость пропускной способности в обеих сетях от уровня интерференции, исходящей от сети BSS2, при использовании различных алгоритмах использования механизма пропуска подканалов.

#### 3.1. Эксперимент 1

Результаты первого эксперимента представлены на рис. 4. При уровне интерференции выше  $-72$  дБм, использование алгоритма СВ почти всегда демонстрирует самые низкие пропускные

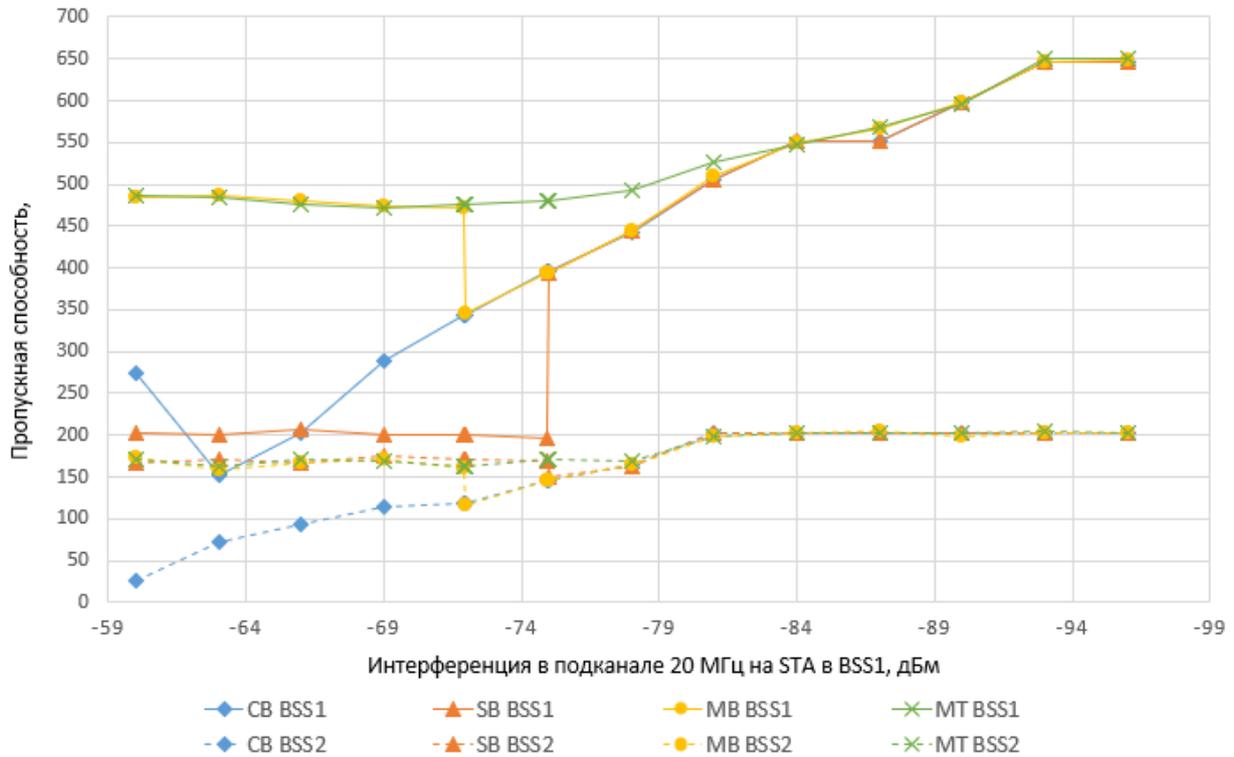


Рис. 4. Эксперимент 1. Зависимость пропускной способности сетей от мощности интерференции для алгоритмов пропуска подканалов.

способности в обеих сетях BSS1 и BSS2. Они обе осуществляют передачи непрерывно, несмотря на высокую интерференцию, и вынуждены использовать низкоскоростные СКК низкого порядка. Исключением является уровень интерференции  $-60$  дБм, когда вторая точка доступа редко получает доступ к каналу. На таком небольшом расстоянии первая точка доступа создает существенные помехи в BSS2. Из-за этого пропускная способность BSS1 оказывается выше, чем при меньших уровнях интерференции. Такая ситуация не является справедливой. При уменьшении интерференции менее  $-72$  дБм пропускные способности сетей монотонно растут с повышением порядка используемых СКК, пока не достигают максимума. BSS1 достигает предела своей пропускной способности в  $650$  Мбит/с и при уровне интерференции  $-91$  дБм. Предел для BSS2 равен  $200$  Мбит/с и достигается при интерференции не более  $-81$  дБм.

При использовании алгоритма SB и уровне интерференции более  $-75$  дБм, первая сеть почти всегда использует только канал primary 40, поскольку secondary 40 определяется занятым, и поэтому обе сети большую часть времени работают в каналах шириной  $40$  МГц. Периодически первая сеть определяет канал свободным и инициирует передачу в канале шириной  $160$  МГц. Однако вторая сеть может начать передачу в это же время, в таком случае происходит коллизия. В результате таких коллизий пропускная способность второй сети находится на уровне  $170$  Мбит/с, а первая сеть обеспечивает немногим более  $200$  Мбит/с за счет частично удачных передач в канале полной ширины. Начиная с мощности интерференции  $-75$  дБм и меньше, первая сеть всегда использует для передачи данных канал шириной  $160$  МГц, поскольку считает его свободным несмотря на интерференцию, и результаты SB совпадают с CB. При этом переключении пропускная способность BSS1 возрастает на  $100\%$ , а в BSS2 она падает на  $15\%$ , из-за того, что интерференция становится постоянной и необходимо использовать низкоскоростные помехоустойчивые СКК.

Алгоритм MB, использующий механизм PR, обеспечивает существенный прирост пропускной способности BSS1 по сравнению с двумя предыдущими. При интерференции более  $-72$  дБм пропускная способность достигает 480 Мбит/с. При меньшем уровне интерференции происходит переключение на использование канала шириной 160 МГц, что приводит к резкому снижению пропускных способностей в обеих сетях примерно на 30%. Несмотря на преодоление порога  $-72$  дБм, позволяющего считать канал свободным, мощность интерференции остается значимой, чтобы заметно уменьшать вероятность корректного декодирования кадра и не давать возможности использовать высокоскоростные СКК. Поведение MB в этих условиях совпадает с СВ.

Алгоритм MT показывает преимущество перед остальными алгоритмами, так как не переключается на использование полной ширины канала до тех пор, пока это, согласно метрике  $R$ , приводит к потере пропускной способности. Он прекращает использовать прокалывание при мощности интерференции  $-84$  дБм. Начиная с этого уровня, все алгоритмы всегда используют полную ширину канала, и поэтому их поведение совпадает.

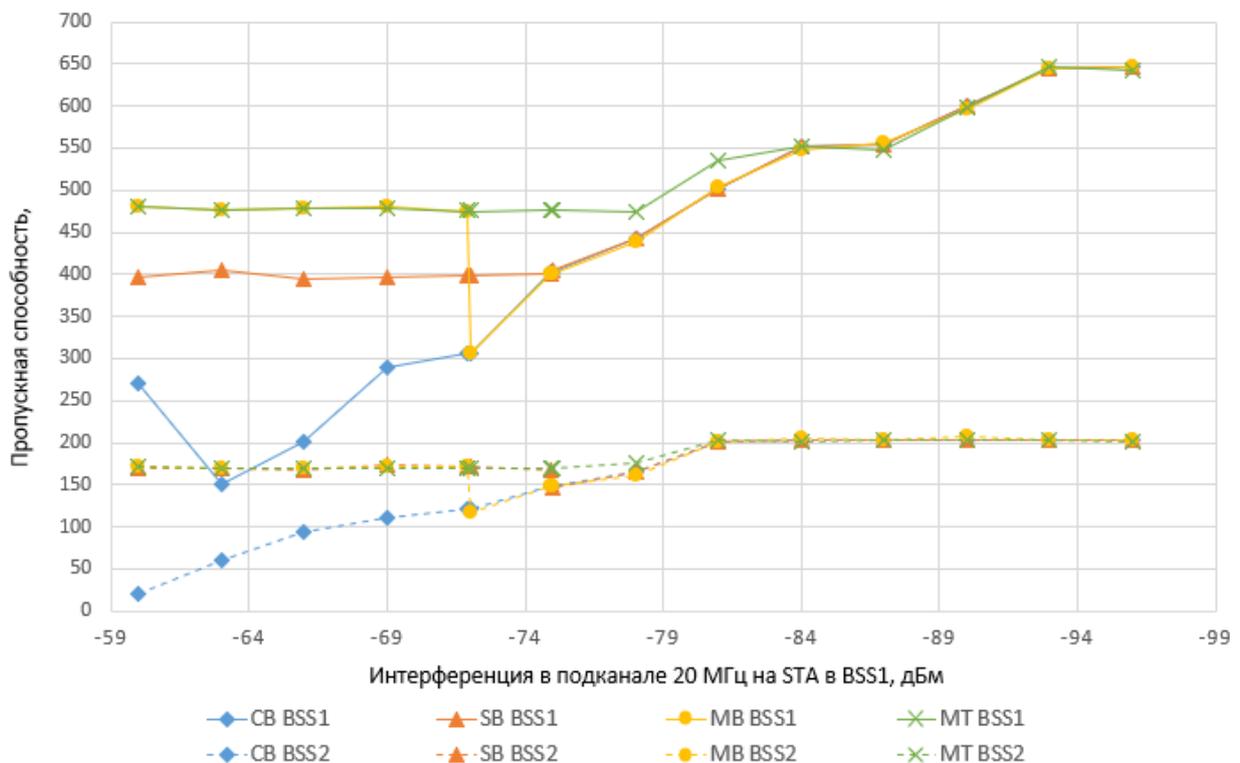


Рис. 5. Эксперимент 2. Зависимость пропускной способности сетей от мощности интерференции для алгоритмов пропуск подканалов.

### 3.2. Эксперимент 2

Во втором эксперименте, результаты которого представлены на рис. 5, сеть BSS2 использует канал, находящийся в secondary 80 сети BSS1. Основное отличие от Эксперимента 1 заключается в поведении алгоритма SB: при уровне интерференции более  $-72$  дБм он показывает примерно вдвое большую пропускную способность, чем в первом эксперименте, за счет использования ширины канала 80 МГц, а не 40 МГц, как было прежде, поскольку помех в secondary 40 больше нет. Поведение сети BSS2 не меняется при перемещении ее канала в secondary 80.

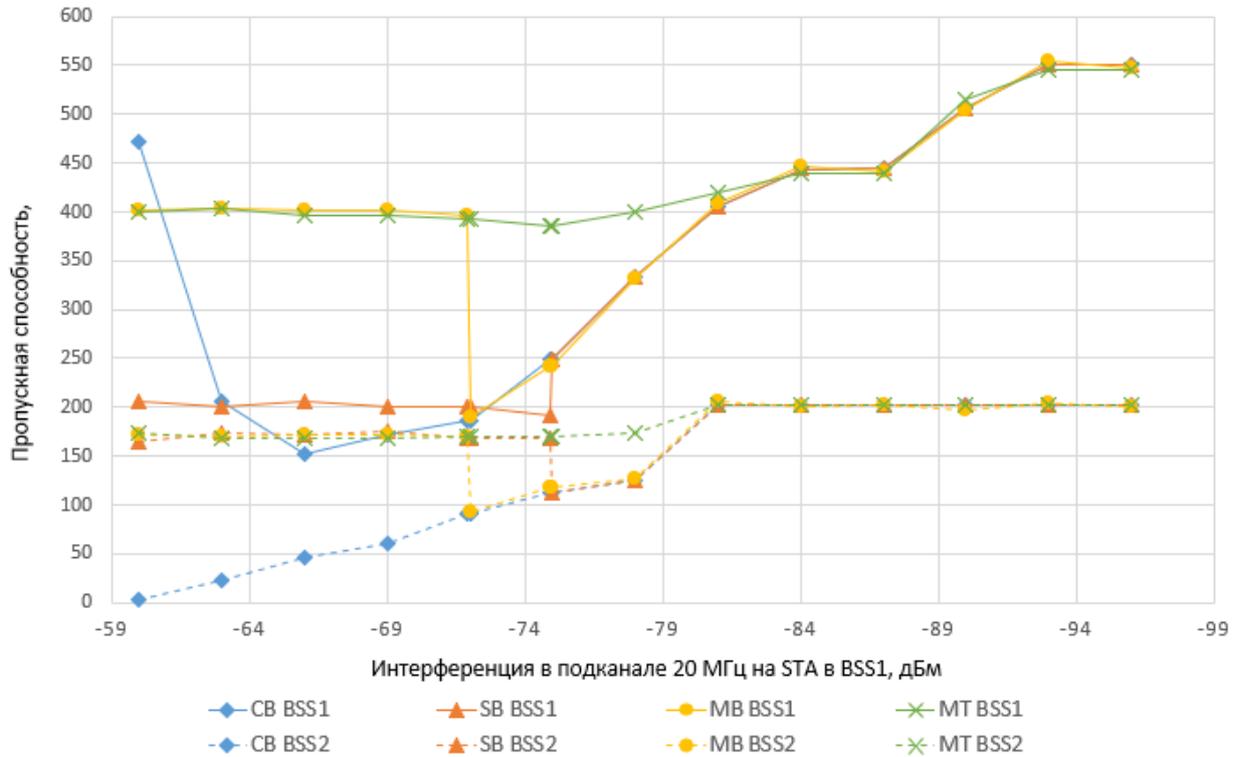


Рис. 6. Эксперимент 3. Зависимость пропускной способности сетей от мощности интерференции для алгоритмов пропуска подканалов.

### 3.3. Эксперимент 3

В третьем эксперименте (см. рис. 6) расстояние между точкой доступа и станцией увеличено до 30 м. При использовании алгоритма СВ для уровней интерференции  $-60$  дБм и  $-63$  дБм точка доступа из сети BSS2 редко получает доступ к каналу, что приводит к высокой пропускной способности в сети BSS1, однако эта схема проигрывает всем остальным по метрике среднего геометрического, так как пропускная способность в сети BSS2 близка к нулю. Пропускные способности при использовании СВ в обеих сетях ниже таковых в первых двух экспериментах из-за меньшей мощности принимаемого сигнала. Пределы пропускных способностей составляют 550 Мбит/с и 200 Мбит/с в сетях BSS1 и BSS2 соответственно, и достигаются при уровнях интерференции  $-93$  дБм и  $-81$  дБм.

При использовании алгоритма SB в BSS2 наблюдается падение пропускной способности при достижении порога детектирования интерференции  $-75$  дБм. Оно более существенное по сравнению с Экспериментом 1 и составляет 40% от значения вместо 25%. BSS1 получает меньше преимуществ от переключения на канал полной ширины: пропускная способность в сети при этом возрастает на 50% (против +100% в Эксперименте 1).

Аналогичная ситуация имеет место при использовании алгоритма MB, где подканал перестает считаться занятым при мощности интерференции менее  $-72$  дБм. Относительное падение пропускной способности в BSS1 увеличилось с 30% до 50%, а в BSS2 — с 30% до 40%, по сравнению с Экспериментом 1. Поведение трех перечисленных алгоритмов начиная с  $-75$  дБм и до минимальных значений интерференции совпадает.

BSS1, использующая алгоритм MT, пропускает подканал с интерференцией аналогично MB, вплоть до уровня интерференции  $-72$  дБм. На участке от  $-72$  дБм до  $-81$  дБм BSS1

продолжает пропускать этот канал, что обеспечивает большую пропускную способность на 100% в BSS1 и на 70% в BSS2 по сравнению с остальными алгоритмами.

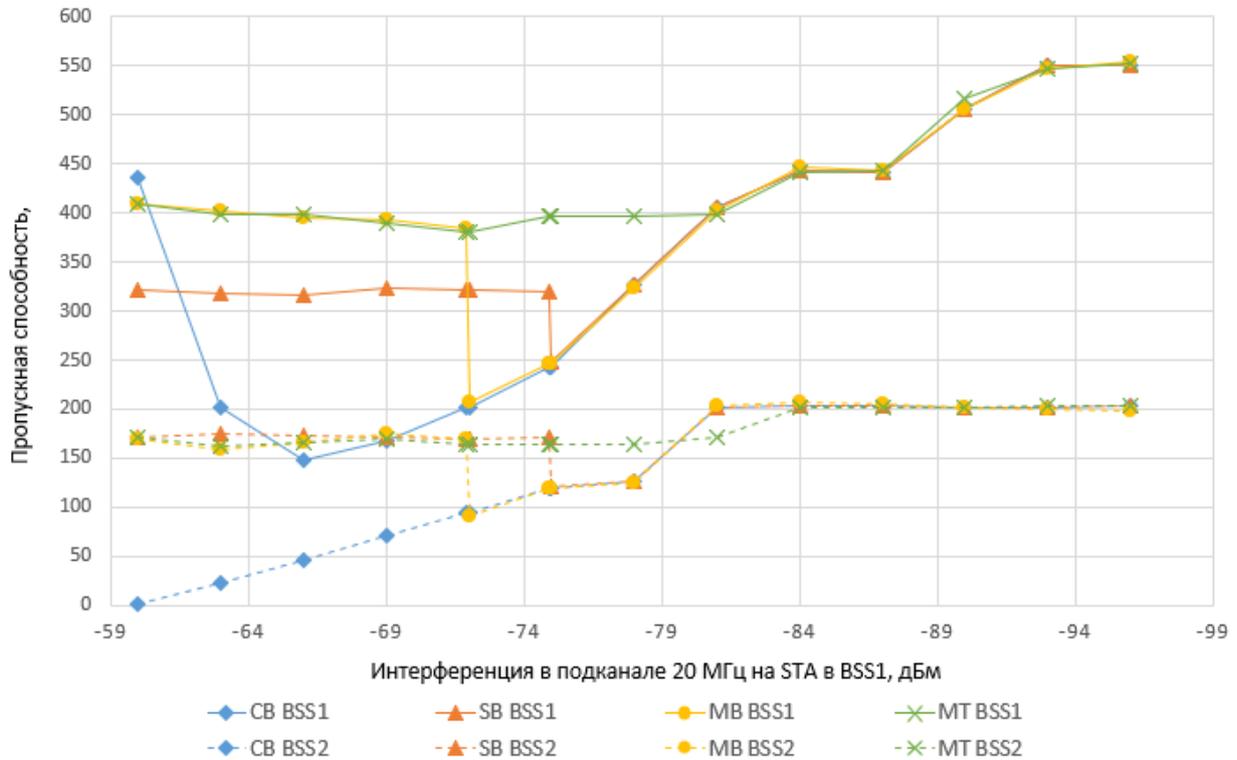


Рис. 7. Эксперимент 4. Зависимость пропускной способности сетей от мощности интерференции для алгоритмов пропуска подканалов.

### 3.4. Эксперимент 4

В четвертом эксперименте, результаты которого представлены на рис. 5, основное отличие демонстрирует алгоритм SB, использующий ширину канала 80 МГц вместо 40 МГц в Эксперименте 3. Это позволяет достичь пропускной способности 320 Мбит/с в сети BSS1 при уровнях интерференции до  $-75$  дБм. В отличие от Эксперимента 2 с меньшим расстоянием, при интерференции менее  $-75$  дБм и переключении на полную ширину канала, происходит потеря пропускной способности составляет 20% в сети BSS1 и 30% в сети BSS2. Это падение значительно больше, чем в первых двух экспериментах, поскольку из-за меньшей мощности сигнала обе сети вынуждены использовать низкоскоростные СКК.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механизм выбора ширины канала с возможностью пропуска подканалов играет ключевую роль в борьбе с интерференцией в плотных сетях Wi-Fi. В данной работе реализован механизм пропуска подканалов в среде имитационного моделирования NS-3, что позволило сравнить эффективность различных алгоритмов выбора ширины используемого канала и пропускаемых подканалов. В работе предложен такой алгоритм, максимизирующий пропускную способность.

Полученные результаты показали эффективность алгоритмов, задействующих механизм пропуска подканалов, по сравнению с алгоритмами, не использующими его. Прирост про-

пускной способности сети при использовании алгоритмов МТ и МВ составляет до 150% по сравнению с СВ из IEEE 802.11ac.

Также показана возможность увеличения пропускной способности для однопользовательских передач с использованием механизма пропуска подканалов, путем внедрения новых алгоритмов, по сравнению с возможностями стандарта IEEE 802.11ac. В сложных условиях возможно обеспечить прирост пропускной способности до 100%, что позволит существенно улучшить пользовательский опыт.

Разработанная модель может быть использована для реализации более сложных сценариев, а также проверки других алгоритмов управления методом пропуска подканалов. В будущих работах планируется провести анализ систем с большим количеством устройств, разрабатывать новые и совершенствовать существующие алгоритмы управления пропуском подканалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, G. Bianchi, "A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs," in *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 197-216, Firstquarter 2019.
2. IEEE P802.11be D1.3 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 8: Enhancements for extremely high throughput (EHT).
3. E. Khorov, I. Levitsky, I. F. Akyildiz, "Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 88664-88688, 2020
4. S. Barrachina-Munoz, F. Wilhelmi, B. Bellalta, "Performance Analysis of Dynamic Channel Bonding in Spatially Distributed High Density WLANs," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*. arXiv preprint arXiv:1801.00594 (2018), <https://arxiv.org/pdf/1801.00594v1.pdf>.
5. S. Barrachina-Munoz, F. Wilhelmi, B. Bellalta, "Dynamic Channel Bonding in Spatially Distributed High-Density WLANs," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 19, no. 4, pp. 821-835, 1 April 2020
6. D. Deng et al., "IEEE 802.11ax: Highly Efficient WLANs for Intelligent Information Infrastructure," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 12, pp. 52-59, Dec. 2017.
7. J. Son et al., "Preamble Puncturing and SIG-B Signaling," doc.: IEEE 802.11-19/1606r0. IEEE TGbe Proposal
8. B. Tian, L. Yang, Y. Kim, "Preamble Puncturing and RU Aggregation," doc.: IEEE 802.11-19/1869r2. IEEE TGbe Proposal
9. Network Simulator 3 (NS-3). – Access mode: <https://www.nsnam.org>.
10. K. Brueninghaus et al., "Link performance models for system level simulations of broadband radio access systems," 2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005, pp. 2306-2311 Vol. 4

### **A Study of Bandwidth Selection Algorithms with Allowed Preamble Puncturing in IEEE 802.11ax and IEEE 802.11be networks**

**Levitsky I.A., Tretiakov A.A., Khorov E.M.**

The latest generation of the IEEE 802.11ax wireless local area networks technology (Wi-Fi 6) is designed to improve the efficiency of channel resource utilization. The choice of bandwidth with the ability to puncture the preamble of the frames, introduced in Wi-Fi 6, is one of the mechanisms to achieve this goal. The IEEE 802.11be standard (Wi-Fi 7), which is being developed at the time of this writing, expands the

capabilities of the preamble puncturing mechanism, making it more flexible. This article uses studies the efficiency of the preamble puncturing mechanism. An algorithm for choosing the bandwidth that considers preamble puncturing is proposed. It is shown that its efficiency is higher than when using the standard rules for selecting the bandwidth.

**KEYWORDS:** 802.11be, Wi Fi 7, channel bonding, preamble puncturing.