

Обслуживание чувствительного к задержке трафика при помощи многоканальных методов доступа в сетях Wi-Fi*

Д.В. Банков, А.И. Ляхов, Е.М. Хоров, К.С. Чемров

bankov@iitp.ru, lyakhov@wireless.iitp.ru, khorov@wireless.iitp.ru,
chemrov@wireless.iitp.ru

Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук,
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Аннотация Обслуживание приложений реального времени, таких как виртуальная и дополненная реальность, удалённое управление и автоматизация производства, является важным сценарием использования сетей Wi-Fi следующего поколения. Для этого в разрабатываемом в настоящее время стандарте IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) вводится ряд новых функций, которые могут гарантировать низкую задержку. Одним из таких нововведений является поддержка устройством одновременной передачи и приема в нескольких каналах, что позволит более гибко использовать частотные ресурсы и устанавливать соответствие между типом трафика и доступным каналом. В данной работе изучаются различные методы многоканального доступа для обслуживания трафика в реальном времени вместе с трафиком, нечувствительным к задержке и даются рекомендации по обслуживанию при различных параметрах трафика и сети.

1 Введение

Существенная часть современных приложений требуют от технологии передачи данных гарантированно низкой задержки и высокой надёжности. Примерами таких приложений реального времени (англ.: Real-Time Applications, RTA) являются видеостриминговые сервисы, виртуальная и дополненная реальность, облачные вычисления, удалённое управление и автоматизация. Технология Wi-Fi используется повсеместно, что делает актуальной задачу адаптации данной технологии к обслуживанию RTA. Однако при обслуживании трафика в сетях Wi-Fi возможны значительные задержки, связанные с тем, что устройства Wi-Fi работают в нелицензируемом диапазоне частот

* Исследование выполнено в ИПФИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00846, <https://rscf.ru/project/21-19-00846/>

и используют метод множественного доступа с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). Из-за этого прерывание чужой передачи недопустимо, следовательно занятость канала чужой передачей (до 5 мс) вызывает существенные задержки даже для высокоприоритетных данных. Задержка при передаче также вносят коллизии кадров от разных устройств.

Специализированная рабочая группа по RTA (англ.: RTA Topic Interest Group, RTA TIG), созданная комитетом по стандартизации IEEE 802.11, определила сценарии, связанные с приложениями, чувствительными к задержке, и изучила ряд возможных методов обеспечения их работы в сетях Wi-Fi [1]. Так, согласно типичным требованиям обслуживания RTA, более 99,999% пакетов должны доставляться с задержкой менее 1–10 мс. Полученные в ходе работы RTA TIG результаты учитываются при разработке нового дополнения к стандарту сетей Wi-Fi, IEEE 802.11be [2] (также известного как Wi-Fi 7). Новые механизмы могут не только повысить пропускную способность, но и снизить задержки обслуживания чувствительного ко времени трафика [3]. Одним из способов снижения задержки, предложенных RTA TIG, является использование введённого в дополнение к стандарту IEEE 802.11ax множественного доступа с ортогональным частотным разделением каналов (англ. Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA). С помощью OFDMA точка доступа Wi-Fi может разделить полосу частот на блоки ресурсов и выделять их станциям, чтобы они могли передавать данные параллельно. В [4,5] предложено несколько алгоритмов для совместного использования методов случайного и детерминированного доступа к каналу в OFDMA для того, чтобы обеспечить низкие задержки для RTA. Реализация данных алгоритмов требует расширения стандартного функционала OFDMA, что, возможно, будет осуществлено в дополнении IEEE 802.11be.

Одно из нововведений дополнения 802.11be — возможность одновременно передавать и принимать данные в нескольких частотных каналах одним устройством (англ.: Multi-Link). В то же время, в стандарте не уточняется, каким способом следует использовать многоканальный доступ для обеспечения требуемого качества обслуживания RTA-трафика. Более того, в сети Wi-Fi каналные ресурсы обычно используются для обслуживания разных типов трафика, например, RTA и трафика, нечувствительного к задержке. Эти факты делают актуальными исследования методов использования многоканального доступа для совместного обслуживания RTA и других типов трафика. В работе [6] показано, что независимый доступ к нескольким каналам с высокой вероятностью снижает задержку передачи срочных пакетов, но авторами не изучается влияние такого метода на спектральную эффективность станций, обслуживающих обычный трафик. Для дополнительного снижения задержки вместе с многоканальным доступом предлагается использовать модифицированный метод доступа к отдельному каналу [7]. Если RTA-трафик периодический или появление RTA-пакетов можно предсказать, то станция может ускорить доступ к каналу, начав отсчёт счётчика отсрочки до прихода пакета. Такой метод позволяет снизить задержку и по-

высить пропускную способность сети по сравнению со стандартным методом доступа. Стоит заметить, что похожего эффекта можно достичь и регулированием параметров стандартного метода доступа. В [8–10] исследуется использование служебного радиointерфейса для приоритизации трафика реального времени, но такой метод сравнивается только со сценарием, в котором обычные и RTA-станции конкурируют за доступом к среде на равных.

В данной работе исследуется несколько методов использования множества каналов в сетях 11be с целью поддержания работы приложений, чувствительных к задержке. Рассматриваемые подходы приоритизация RTA-трафика используют изменение стандартных параметров доступа, выделение одного канала в качестве служебного, а также установление соответствия между каналом и типом обслуживаемого трафика. Работоспособность методов в различных сценариях оценивается не только по выполнению требований RTA на качество обслуживания, но и по влиянию на эффективность работы станций, передающих несрочные данные.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 описаны исследуемые технологии доступа к среде, сценарий и постановка задачи. В разделе 3 приведен сравнительный анализ исследуемых методов многоканального доступа. Заключение работы содержится в разделе 4.

2 Описание системы

2.1 Доступ к каналу в сетях Wi-Fi

Основной метод доступа к каналу в современных сетях Wi-Fi называется EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access, улучшенный распределённый доступ к каналу) и является разновидностью CSMA/CA. Согласно EDCA каждое устройство поддерживает очередь из кадров на передачу. Новый кадр передаётся сразу, если эта очередь пуста, а среда не занята. Иначе станция инициализирует счётчик отсрочки случайной целой величиной, равномерно распределенной на отрезке $[0, CW_r - 1]$, где CW_r называется конкурентным окном (англ.: Contention Window), а r — номер попытки передачи. В случае каждой неудачной попытки окно увеличивается, если не достигло максимального значения CW_{max} . Пакет отбрасывается при достижении предельного числа попыток передачи (англ.: Retry Limit, RL):

$$CW_r = \begin{cases} CW_{min}, & r = 0; \\ \min\{2CW_{r-1}, CW_{max}\}, & r \in (0, RL]. \end{cases}$$

Счётчик отсрочки уменьшается на единицу, если канал был свободен в течение промежутка времени T_e . При этом счётчик не меняется, пока канал занят и ещё в течение промежутка $AIFS$ (англ.: Arbitration Interframe Space) после его освобождения. Попытка передачи осуществляется в случае обнуления счётчика. В качестве подтверждения успешного получения кадра, принимающее устройство спустя время $SIFS$ (англ.: Short Interframe Space)

должно передать служебный кадр АСК (англ.: acknowledgment). Отправляющая станция будет считать передачу неуспешной, если она не получила АСК в течение промежутка времени *AckTimeout*.

В соответствии с различными требованиями к качеству обслуживания, в EDCA различается четыре категорий доступа: Voice (голосовой трафик), Video (видеопотоки), Best effort (обычный трафик) и Background (фоновый трафик). Для кадров, относящихся к определенной категории, устройство Wi-Fi имеет отдельную очередь со своими параметрами доступа к каналу: CW_{min} , CW_{max} , $AIFSN$ и TXOP Limit. Здесь $AIFSN$ — целое число от 1 до 15, определяющее величину $AIFS = SIFS + T_e \cdot AIFSN$. Параметр TXOP Limit устанавливает максимальное время, на которое станция может занять канал. В стандарте определены значения данных параметров по умолчанию для всех категорий, однако точка доступа имеет возможность менять их. Такой способ приоритизации уменьшает среднюю задержку и в среднем даёт больше канальных ресурсов определенным категориям трафика. Однако для приложений реального времени, имеющих очень строгие требования к качеству обслуживания, такая приоритизация трафика может быть недостаточной, тогда необходимо предоставление абсолютного приоритета относительно других типов трафика.

Если устройства передают кадры больших размеров, оказывается эффективным использование механизма RTS/CTS. Согласно данному механизму перед отправкой данных, устройство передаёт служебный кадр RTS (англ.: Request-to-Send), запрашивающий передачу, и ждёт в ответ кадр CTS (англ.: Clear-to-Send), разрешающий передачу, и только после получения CTS станция передаёт кадр данных. Такой механизм увеличивает пропускную способность сети, так как кадры RTS и CTS короткие, следовательно, попадание в коллизию двух кадров RTS занимает меньше времени, чем коллизия длинных кадров с данными.

Ещё одним важным механизмом является виртуальная занятости среды. Во многих кадрах, например, RTS и CTS, имеется поле Duration, в которое записывается время, в течение которого после данного кадра среда будет виртуально занята. Получив такой кадр станция взводит на заданное время счётчик NAV (англ.: Network Allocation Vector), и считает среду занятой даже если в канале не детектируется передача какого-либо кадра. Таким образом, передавая в кадрах RTS/CTS длительность последующей передачи данных, можно дополнительно защитить от коллизии передачу кадра с данными.

2.2 Многоканальный доступ

Важным нововведением Wi-Fi 7 является встроенная поддержка работы устройства в нескольких частотных каналах одновременно (англ.: Multi-Link Operation, MLO). В стандарте 802.11be вводится понятие многоканального устройства (англ.: Multi-Link Device, MLD), у которого в один логический интерфейс объединены несколько физических интерфейсов для доступа к беспроводной среде. Таким образом, MLD получает доступ к каналу как

Таблица 1: Стандартные параметры EDCA для станций

Категория доступа	CWmin	CWmax	AIFSN	TXOP Limit
Best effort	16	1024	3	2,528 мс
Voice	4	8	2	2,080 мс

несколько отдельных станций Wi-Fi, но с точки зрения протоколов более высокого уровня выглядит как одно устройство.

Для классификации данных в зависимости от требований на качество обслуживания в стандарте IEEE 802.11 используется понятие «идентификатор трафика» (англ.: Traffic Identifier, TID), и существует соответствие между TID и используемой для обслуживания данного типа трафика категорией доступа EDCA. В рамках многоканального доступа в дополнении 802.11be определяется механизм TID-to-link mapping, с помощью которого можно установить соответствие между TID и доступными для восходящего и нисходящего потока каналами. По умолчанию данные с любым TID могут передаваться по любому из них, но механизм TID-to-link mapping позволяет станции, например, передавать кадры с высокой надёжностью и малой задержкой по одному каналу, а нечувствительные к задержке данные — по другому.

2.3 Сценарий и постановка задачи

В рамках исследования рассматривается несколько пересекающихся сетей Wi-Fi, в которых работает некоторое число станций, поддерживающих многоканальный доступ. Из них N станций (далее *обычные станции*) генерируют несрочный насыщенный трафик, то есть у них в очереди на передачу всегда имеются кадры, а M станций (далее *RTA-станции*) обслуживают приложения реального времени и генерируют ненасыщенный трафик: после отправки пакета новый пакет генерируется через случайное время, распределённое экспоненциально с одинаковым средним. По умолчанию, срочный трафик относится к категории Voice, а обычный к категории Best effort (таблица 1).

Все RTA-станции передают кадры одного фиксированного размера. Длительность успешной передачи состоит из длительностей кадра данных, кадра подтверждения и при необходимости кадров RTS/CTS: $T_{RTA} = (RTS + SIFS + CTS + SIFS) + T_{data} + SIFS + ACK$, здесь T_{data} — длительность кадра данных RTA в рассматриваемом канале. Обычные станции используют механизм RTS/CTS и занимают канал на максимально возможное время, определяемое TXOP Limit. Коллизия занимает канал на время $RTS + AckTimeout$, если обе передающие станции используют механизм RTS/CTS и $T^{max} + AckTimeout$ в противном случае, где T^{max} — длительность наибольшего кадра, попавшего в коллизия. Сигнально-кодовая конструкция

выбирается достаточно надёжной, чтобы пренебречь потерями пакетов из-за случайного шума.

Для обслуживания всех устройств имеется четыре канала шириной по 80 МГц. Характеризовать качество обслуживания RTA-трафика будем с помощью 99,999%-квантиля задержки при передаче пакетов RTA. Требования к качеству обслуживания выполняются, если 99,999%-квантиль задержки не превышает заданного ограничения. Для исследования влияния срочных передач на работу обычных станций определим эффективность использования канала как долю времени, в течение которого обычные станции успешно передают полезные данные. Далее в разделе 2.4 будут описаны четыре метода использования множества каналов с целью обеспечить необходимое качество обслуживания RTA-трафика и максимизировать эффективность использования беспроводной среды обычными станциями. Задача работы — сравнить данные подходы в разных сценариях. Требуется при необходимости оптимизировать параметры методов и с помощью имитационного моделирования определить, какой из них является наиболее предпочтительным в зависимости от интенсивности RTA-трафика, размера пакетов и требований на обслуживание приложений реального времени.

2.4 Методы разделения каналов

Рассмотрим четыре метода использования четырех каналов по 80 МГц для обслуживания N обычных (non-RTA) и M RTA-устройств (рис. 1). В сценариях с достаточно длинными кадрами данных используется механизм RTS/CTS, чтобы уменьшить влияние коллизий на задержку. Каждый подход отличается распределением доступных каналов и способами приоритизации срочного трафика перед обычным.

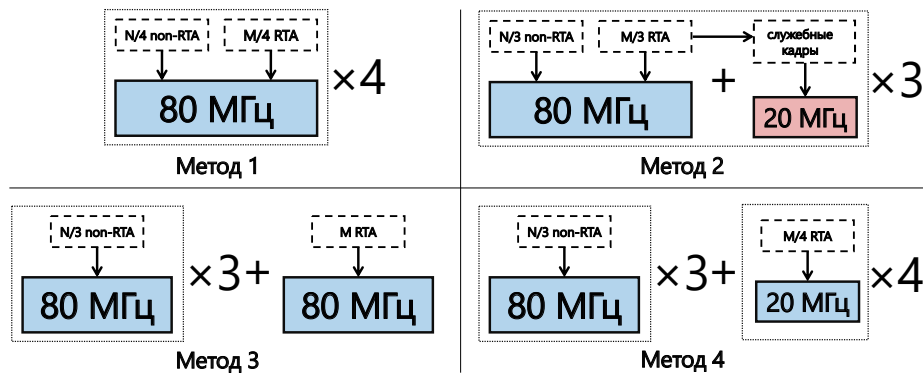


Рис. 1: Схемы исследуемых методов распределения частотных ресурсов

Согласно методу 1 устройства всех типов трафика равномерно распределяются по четырём каналам, то есть механизм TID-to-link mapping исполь-

зуется в режиме по умолчанию. Таким образом, в одном канале 80 МГц обслуживается трафик от $N/4$ обычных станций и RTA-трафик от $M/4$ станций. В данном методе выделяется отдельная категория доступа для трафика, чувствительного ко времени и устанавливаются параметры метода доступа для данной категории и других категорий так, чтобы обеспечить абсолютный приоритет пакетам RTA перед обычными [11]. Для этого минимальный и максимальный размеры конкурентного окна для RTA-станций устанавливается меньше разницы значений параметра $AIFSN$ для обычных и RTA-станций:

$$CW_{min}^{RTA} \leq CW_{max}^{RTA} \leq AIFSN_{\text{non-RTA}} - AIFSN_{RTA}. \quad (1)$$

Чтобы уменьшить время ожидания окончания чужой передачи, для категории доступа, соответствующей трафику, не чувствительному ко времени, устанавливается низкий TXOP Limit. Эффективность такого способа сокращения задержки обслуживания RTA исследована в [12]. Таким образом, задержка, связанная с конкуренцией за доступ к каналу уменьшена, но при этом эффективность обычных устройств падает из-за сокращения доли полезных данных в одной передаче.

В рамках метода 2 три канала по 80 МГц используются для передачи данных, а из четвертого канала выделяются 3 канала по 20 МГц в качестве служебных. Таким образом, система состоит из 3 пар каналов: основной (80 МГц) и служебный (20 МГц). На каждую такую пару приходится 1/3 от числа обычных и RTA-станций. Приоритизация срочного трафика достигается с помощью резервирования основного канала для срочных данных. Более того, передача обычных данных может быть прервана служебным кадром. Если на станции сгенерировался срочный пакет на передачу, то перед попыткой доступа к основному каналу, она отправляет короткий кадр в служебном. Обычные станции, получив такой кадр в назначенном им канале 20 МГц, обязаны прервать передачу и освободить основной канал для срочных данных.

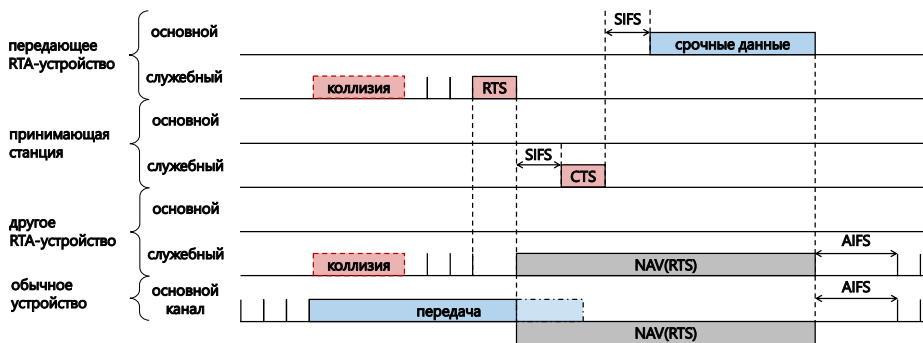


Рис. 2: Схема работы служебного канала при использовании метода 2

В качестве служебных кадров рассмотрим модифицированный RTS, в ответ на который принимающая станция отправляет модифицированный CTS (рис. 2). Получив эти кадры, обычные станции считают основной канал виртуально занятым, для этого индикатор NAV выставляется в соответствии с указанным временем передачи срочных данных. Дополнительным преимуществом такого подхода является тот факт, что коллизии между RTA-передачами не происходят в основном канале, так как конкуренция происходит в служебном канале между короткими кадрами.

Таким образом, в методе 2 полностью отсутствуют задержки, связанные с конкуренцией между обычными и RTA-станциями, однако по сравнению с методом 1 в одном канале соревнуется больше RTA-станций. Кроме того, эффективность обычных станций падает из-за того, что один канал шириной 80 МГц не используется для передачи данных.

В рамках метода 3 один канал выделяется для обслуживания только RTA-трафика, его используют все M станций. В оставшихся трёх каналах передают по $1/3$ от числа обычных станций. Для этого с помощью механизма TID-to-link mapping одному каналу 80 МГц назначается TID, соответствующий срочному трафику, а в оставшихся доступных каналах будут передаваться данные остальных TID. Такой метод достаточно простой и избавляет от конкуренции RTA-устройств с обычными. С другой стороны, дополнительную задержку вызывает высокая конкуренция между большим числом RTA-станций в одном канале, а эффективность обычных станций снижается из-за того, что один канал ими не используется.

Отличие метода 4 от предыдущего заключается в том, что для трафика RTA выделяется не один канал шириной 80 МГц, а четыре узких по 20 МГц. При использовании данного метода эффективность использования канала обычными станциями не изменится по сравнению с использованием метода 3, но теперь в одном канале будут передавать в четыре раза меньше RTA-станций, что уменьшит конкуренцию, а значит и задержку, связанную с ней. Однако в более узком канале при использовании той же сигнально-кодовой конструкции (СКК) передачи срочных пакетов становятся длиннее в четыре раза. Учтём, что чувствительность канала 20 МГц на 6 дБ выше, чем канала 80 МГц. Это позволит выбрать более быструю СКК, не уменьшая надёжность передачи. Так, если в канале 80 МГц передаются кадры с модуляцией QPSK или 16-QAM, то в канале 20 МГц может быть выбрана СКК в два раза быстрее. Следовательно, можно считать, что время передачи кадров RTA в методе 4 больше примерно в два раза, чем в предыдущих подходах.

3 Сравнительный анализ методов

Численные результаты получены для случая с $N = 36$ обычными станциями и $M = 12$ RTA-станциями. Для каждого сценария будем рассматривать 99,999%-квантиль задержки передачи кадров RTA, показывающий максимальную задержку доставки пакета с заданной вероятностью. Эффектив-

ность обычных станций оценивается как доля времени, в течение которого они передают полезные данные. Будем нормировать эту величину на значение эффективности в случае, когда в сети отсутствуют устройства RTA, а обычные станции равномерно распределены по доступным каналам.

В рамках модели предполагается, что все станции находятся в зоне видимости друг друга, а СКК выбираются достаточно надёжными, что позволяет пренебречь потерей кадров из-за случайного шума в канале.

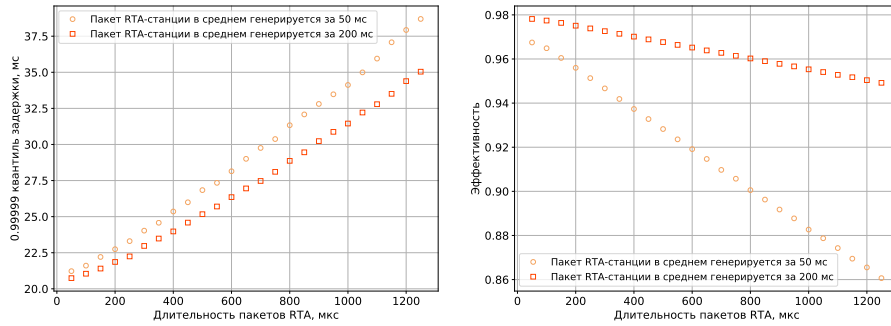


Рис. 3: Зависимости квантиля задержки и эффективности от размера пакетов RTA при использовании стандартных значений параметров доступа (табл.1).

Для начала покажем, что использование стандартных параметров EDCA не позволяет обслуживать RTA. На рис. 3 приведены графики зависимости квантиля задержки и эффективности от размера RTA-пакета для случая стандартных значений параметров EDCA и равномерного распределения станций по каналам. То есть в одном канале 80 МГц конкурируют 9 устройств с трафиком категории Best effort и 3 — категории Voice (табл. 1). Рассматриваются случаи, когда среднее время генерации RTA-пакета на одном устройстве составляет 50 мс и 200 мс. Станции RTA используют механизм RTS/CTS в случаях, когда передаваемые ими пакеты достаточно длинные (200 мкс и более). При стандартных EDCA-параметрах срочный трафик оказывается недостаточно приоритетным, так как станции RTA могут проиграть соревнование за канал по счетчику отсрочки. Более того, ожидание окончания чужой передачи может быть более 2,5 мс. Из-за этого даже при достаточно редком потоке коротких RTA-пакетов, квантиль задержки оказывается выше 20 мс. Несмотря на то, что эффективность обычных станций остается достаточно высокой, применение стандартных параметров доступа к каналу и увеличение числа доступных каналов без каких-либо дополнительных механизмов не позволяет обслуживать трафик RTA.

Перейдём к описанным в разделе 2.4 методам разделения станций по каналам. На рис. 4 представлены графики для среднего времени генерации пакетов RTA-станции равного 50 мс. В области коротких RTA-пакетов ме-

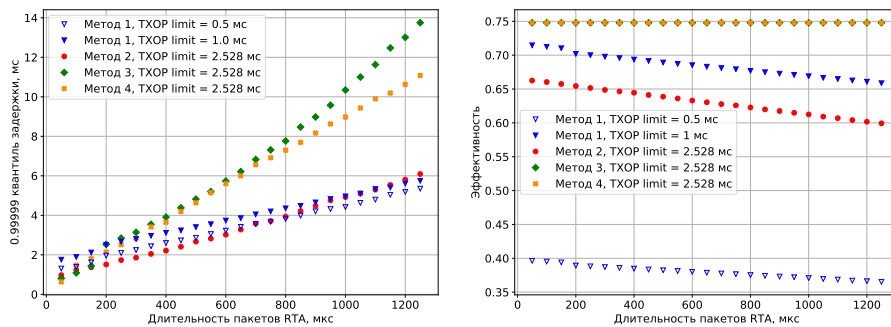


Рис. 4: Зависимости квантиля задержки и эффективности от размера пакетов RTA, среднее время генерации которых равно 50 мс.

ханизм RTS/CTS не используется, поэтому методы 3 и 4 имеют меньший квантиль по сравнению с методом 2, на задержку которого влияет время передачи служебных кадров. Метод 1 в этом случае оказывается самым неэффективным, потому что ограничение TXOP Limit даже до 0,5 мс не позволяет добиться низкого квантиля задержки, но снижает эффективность почти в два раза.

Для средних значений длины RTA-пакетов (200–1000 мкс) и строгих ограничений на задержку (менее 5 мс) оптимальным является метод 1. Такой результат связан с тем, что в методе 1 ограничение TXOP Limit значительно снижает эффективность, а в методах 3 и 4 строгие требования не могут быть выполнены из-за более высокой конкуренции и более длительных передачах соответственно. В области больших RTA-пакетов метод 1 с ограничением TXOP Limit до 1 мс оказывается эффективнее метода 2 при примерно равных значениях квантиля задержки. Это вызвано тем, что большие частые кадры увеличивают задержку, связанную с ожидаем окончанием передачи других RTA-станций. Уменьшить ее удаётся в методе 1 использованием всех четырёх каналов для передачи данных.

Для менее строгих требований на качество обслуживания RTA могут подойти более простые методы 3 и 4. Причём последний имеет меньший квантиль задержки, так как RTA-трафик достаточно интенсивный, из-за чего снижение конкуренции за счёт распределения станций по узким подканалам оказывает большее влияние, чем увеличение длительности передачи.

Рассмотрим более редкий поток RTA-пакетов со средним временем генерации равным 200 мс (графики представлены на рис. 5). Важным отличием этого случая, от предыдущего заключается в том, что теперь для нестрогих ограничений на задержку оптимальным является метод 3, а не 4. Уменьшение интенсивности снижает влияние конкуренции за доступ на задержку, поэтому использование большего числа узких каналов не сильно улучшает качество обслуживания. При ограничении TXOP Limit = 1 мс метод 1 близок к методу 2 и по эффективности, но уступает по квантилю более, чем

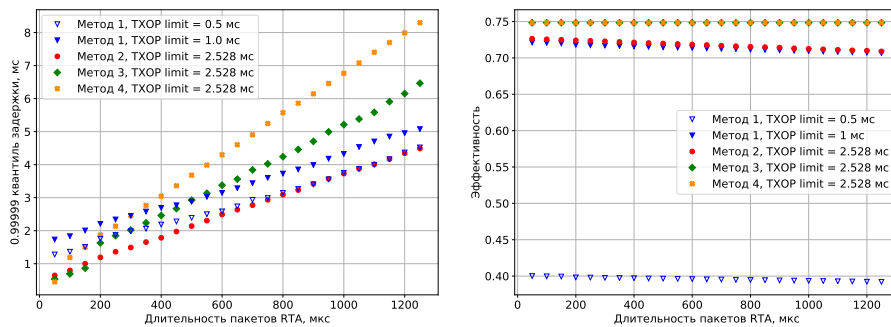


Рис. 5: Зависимости квантиля задержки и эффективности от размера пакетов RTA, среднее время генерации которых равно 200 мс.

на 1 мс. Однако уменьшение TXOP Limit слабо сказывается на задержке, но значительно снижает эффективность обычных станций. Таким образом, при наиболее высоких требованиях на обслуживание RTA, метод с выделением служебного канала является самым предпочтительным. Исключение составляют случаи очень коротких кадров, в которых методы 3 и 4 могут не использовать RTS/CTS и обслуживать срочный трафик с меньшей задержкой.

4 Заключение

В данной работе были исследованы методы распределения частотных ресурсов между станциями в сетях Wi-Fi с использованием многоканального доступа. Цель каждого метода — обеспечить обслуживание приложений реального времени и эффективную работу обычных станций. С помощью имитационного моделирования определены сценарии, для которых каждый из исследуемых методов является наиболее предпочтительным с точки зрения выполнения требований на передачу срочных данных и влияния на устройства, обслуживающие обычный трафик.

Если размер срочных пакетов маленький, трафик достаточно редкий, а требования на его обслуживание нестрогие, то наиболее эффективным является выделение отдельного канала для передачи данных, чувствительных ко времени. Распределение устройств по нескольким узким каналам может снизить задержку в случае немного более интенсивного срочного трафика. Для длинных передач станциями, обслуживающими приложения реального времени со строгими ограничениями на задержку, необходимо использовать другие подходы. Приоритизация трафика с помощью изменения параметров доступа к среде и ограничения несрочных передач по времени оптимальна в сценариях с частыми длинными передачами срочных данных. Для случаев более редкого потока чувствительных ко времени пакетов с промежуточными значениями длины значительный выигрыш в спектральной эффектив-

ности даёт выделение одного из доступных каналов в качестве служебного, чтобы уведомлять в нем обычные устройства о необходимости освободить основной канал для передачи срочных кадров.

Список литературы

1. IEEE 802.11 Real Time Applications TIG Report.
URL <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-2009-06-0rta-rta-report-draft.docx>
2. E. Khorov, I. Levitsky, I. F. Akyildiz, Current status and directions of ieee 802.11be, the future wi-fi 7, *IEEE Access* 8 (2020) 88664–88688. doi:10.1109/ACCESS.2020.2993448.
3. T. Adame, M. Carrascosa-Zamacois, B. Bellalta, Time-sensitive networking in ieee 802.11 be: On the way to low-latency wifi 7, *Sensors* 21 (15) (2021) 4954.
4. E. Avdotin, D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov, Enabling massive real-time applications in ieee 802.11be networks, in: 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), IEEE, 2019, pp. 1–6. doi:10.1109/PIMRC.2019.8904271.
5. E. Avdotin, D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov, Resource Allocation Strategies for Real-Time Applications in Wi-Fi 7, in: 2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), IEEE, 2020, pp. 1–6.
6. G. Naik, D. Ogbe, J.-M. J. Park, Can Wi-Fi 7 Support Real-Time Applications? On the Impact of Multi Link Aggregation on Latency, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Xiamen, China, 2021, pp. 28–30.
7. H. Park, C. You, Latency Impact for Massive Real-Time Applications on Multi Link Operation, in: 2021 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP), 2021, pp. 1–5. doi:10.1109/TENSYMP52854.2021.9550829.
8. D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov, M. Sandal, Enabling low latency communications in wi-fi networks, in: Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on, IEEE, 2018, pp. 1–5.
9. D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov, M. Sandal, Enabling real-time applications in wi-fi networks, *International Journal of Distributed Sensor Networks* 15 (5) (2019).
10. D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov, M. Sandal, Approach to Real-Time Communications in Wi-Fi Networks, *Journal of Communications Technology and Electronics* 64 (8) (2019) 880–889.
11. E. Genc, L. F. Del Carpio, Wi-Fi QoS Enhancements for Downlink Operations in Industrial Automation Using TSN, in: 2019 15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS), IEEE, 2019, pp. 1–6.
12. D. Bankov, K. Chemrov, E. Khorov, Tuning Channel Access to Enable Real-Time Applications in Wi-Fi 7, in: 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), IEEE, 2020, pp. 20–25. doi:10.1109/ICUMT51630.2020.9222409.