

Об использовании многоканальных методов доступа для обслуживания приложений реального времени в сетях Wi-Fi¹

Д.В. Банков^{*,**,***}, А.И. Ляхов^{*,**}, Е.М. Хоров^{*,**,***}, К.С. Чемров^{*,**}

^{*}Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

^{**}Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Москва

^{***}Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

Поступила в редколлегию 28.07.2021

Аннотация—Важным сценарием использования сетей Wi-Fi нового поколения является обслуживание приложений реального времени, таких как виртуальная и дополненная реальность, удалённое управление, видеостриминговые сервисы. Для этого в разрабатываемый на данный момент стандарт IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) планируется добавить несколько новых технических возможностей, при помощи которых можно будет гарантировать низкую задержку. Одним из таких нововведений является поддержка одновременной передачи и приема информации устройством в нескольких частотных каналах, которая позволит устройствам более гибко использовать каналные ресурсы, а также позволит использовать разные каналы для разных типов трафика. В данной работе исследуются разные методы использования множества каналов для обслуживания трафика реального времени вместе с обычным, не чувствительным к задержке, трафиком. Сравниваются подходы с использованием отдельного канала для служебных кадров, с установкой приоритетных параметров доступа к среде, а также с выделением отдельных каналов для обслуживания только срочного трафика. Выявлены сценарии, в которых каждый из методов является оптимальным с точки зрения выполнения требований приложений реального времени и эффективности работы обычных устройств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: беспроводная локальная сеть, Wi-Fi 7, IEEE 802.11be, многоканальный доступ, надежность, низкая задержка, приложения реального времени

DOI: 10.53921/18195822_2021_21_3_162

1. ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой частью современного мира становятся приложения реального времени (англ.: Real-Time Applications, RTA). Виртуальная и дополненная реальность, облачные вычисления, видеостриминговый сервис, удаленное управление и автоматизация производства — все эти приложения реального времени требуют от технологии передачи данных гарантированно низкой задержки и высокой надежности. Изначально задача обслуживания RTA рассматривалась в рамках проводных сетей Ethernet, и были разработаны стандарты чувствительного ко времени сетевого обмена данными IEEE 802.1 TSN [1] (англ.: Time Sensitive Networking). Однако существуют сценарии, в которых использование проводных сетей невозможно или невыгодно, и поэтому активно исследуются альтернативные типы связи. Важным примером использования беспроводных технологий для обслуживания трафика, чувствительного к задержке, является сверхнадежная связь с низкой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low Latency

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00846, <https://rscf.ru/project/21-19-00846/>

Communications, URLLC) — одна из важнейших сервисов, предоставляемых сотовыми сетями пятого поколения.

Ввиду повсеместного распространения технологии Wi-Fi актуальной является задача адаптации данной технологии к новым популярным приложениям. Однако по сравнению с сетями Ethernet, преимущественно состоящих из соединений типа «точка-точка», и сотовыми сетями, работающими преимущественно в лицензированном диапазоне частот, обслуживание RTA с помощью технологии Wi-Fi является более сложной задачей. Работающие в нелицензируемом диапазоне частот устройства Wi-Fi используют метод множественного доступа с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). Канал может быть занят чужой передачей длительное время (до 5 мс), что вызывает значительные задержки даже для высокоприоритетных данных, так как прерывание чужой передачи недопустимо. Задержка при передаче также может быть увеличена из-за коллизий кадров от разных устройств.

Специализированная рабочая группа по RTA (англ.: RTA Topic Interest Group, RTA TIG), созданная комитетом по стандартизации IEEE 802 LAN/MAN, определила сценарии, связанные с приложениями, чувствительными к задержке, и изучила ряд возможных методов обеспечения их работы в сетях Wi-Fi [2]. Так, согласно типичным требованиям обслуживания RTA, более 99,999% пакетов должны доставляться с задержкой не более 1–10 мс. Результаты работы RTA TIG учитываются при разработке нового дополнения к стандарту сетей Wi-Fi, IEEE 802.11be [3] (также известного как Wi-Fi 7). Одним из нововведений дополнения 802.11be является возможность одновременного доступа к нескольким частотным каналам одним устройством (англ.: Multi-Link). Встроенный многоканальный доступ может не только повысить пропускную способность, но и снизить задержки обслуживания срочного трафика. В то же время, в стандарте не описывается, каким способом следует использовать многоканальный доступ для обеспечения требуемого качества обслуживания для RTA-трафика. Этот факт, а также то, что в сети Wi-Fi каналные ресурсы обычно требуется использовать для обслуживания разных типов трафика, например, RTA и трафика, нечувствительного к задержке, делают актуальными исследования методов использования многоканального доступа для совместного обслуживания RTA и других типов трафика.

В данной работе исследуются несколько методов использования множества каналов в сетях 11be с целью поддержания работы приложений, чувствительных к задержке. Рассматривается приоритизация RTA-трафика с помощью изменения стандартных параметров доступа, использования одного канала в качестве служебного, а также установления соответствия между каналом и типом трафика, который в нем обслуживается. Работоспособность методов в различных сценариях оценивается не только по выполнению требований RTA на качество обслуживания, но и по их влиянию на эффективность работы станций, передающих несрочные данные.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 описаны известные из литературы решения по обслуживанию RTA в сетях Wi-Fi, а также исследования, связанные с многоканальным доступом. Раздел 3 содержит краткую информацию об исследуемых технологиях доступа к среде, описание сценария и постановку задачи. В разделе 4 приведён сравнительный анализ исследуемых методов многоканального доступа. Заключение работы содержится в разделе 5.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Решения по обслуживанию RTA в сетях Wi-Fi представлены во многих работах. Так, в [4–6] разработан метод приоритизации трафика реального времени с помощью служебного радиointерфейса. При использовании данного метода станция должна иметь два интерфейса: основной и служебный. При появлении срочных кадров станция в отдельном канале передаёт сигнал

занятости при помощи служебного радиointерфейса. Все устройства, получившие такой сигнал, должны прервать свою передачу данных, не чувствительных к задержке. Авторами [5, 6] также разработана математическая модель процесса передачи с использованием данного метода, но исследование ограничивается сравнением такого метода со стандартным доступом к среде без распределения приоритетов.

Другая идея использования нескольких каналов для снижения задержки представлена в [7]. Здесь предлагается адаптировать для Wi-Fi метод дублирования срочных пакетов и их параллельной передачи через несколько интерфейсов, который был разработан для сетей Ethernet. Однако остается сложность, связанная с взаимодействием беспроводных интерфейсов — если интерфейсы полностью независимы друг от друга, они могут передавать лишние копии пакетов и таким образом чрезмерно потреблять каналные ресурсы. Для повышения спектральной эффективности в случае успешной передачи в одном канале можно уведомлять об этом интерфейс, работающий в другом канале [8]. Тогда он сможет удалить из очереди копию пакета, сэкономив каналное время. Стоит отметить, что такой подход хоть и снижает среднюю задержку для срочного трафика, но сам по себе не гарантирует низкую задержку порядка 1 мс, так как каналы могут быть заняты передачей данных, не чувствительных ко времени.

Уменьшения задержки добиваются и более простыми способами. Например, в [9] рассматривается введение новой категории доступа для трафика, чувствительного ко времени, и установка параметров метода доступа для данной категории и других категорий так, чтобы обеспечить абсолютный приоритет пакетам RTA перед обычными при доступе к каналу.

Дополнение IEEE 802.11be к стандарту Wi-Fi, вводит ряд новых механизмов, подробно разобранных в работе [3]. Применение этих нововведений для обслуживания чувствительного ко времени трафика рассматривается в [10]. Одним из таких новых решений является многоканальный доступ, который уже активно изучается не только в рамках рабочей группы 11be, но и в ряде научных исследований [11, 12]. Однако текущие исследования фокусируются на влиянии межканальной интерференции и потенциальном выигрыше в пропускной способности, а такой показатель, как распределение задержки при передаче кадров не рассматривают.

Использование многоканального доступа для обслуживания приложений реального времени исследуется в работе [13]. С помощью имитационного моделирования исследуется передача срочных данных с разной интенсивностью независимо в нескольких каналах. Показано, что даже в худшем сценарии, когда в разных частотных каналах присутствуют станции, генерирующие насыщенный трафик и не поддерживающие многоканальный доступ, RTA-пакеты с большой вероятностью доставляются с низкой задержкой. Стоит отметить, что в данном исследовании не рассматривается влияние такого подхода на эффективность использования каналных ресурсов обычными станциями, передающими неприоритетный трафик.

В настоящей работе изучается ряд методов использования многоканального доступа с целью надёжно обслужить RTA-трафик с низкой задержкой. Рассматриваемые методы используют как возможности многоканального доступа, так и стандартные методы приоритизации. В различных сценариях определяются наиболее предпочтительные методы не только по качеству обслуживания срочного трафика, но и по эффективности работы обычных станций.

3. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

3.1. 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. Каждое устройство имеет очередь из кадров, ожидающих передачу. Новый кадр передается сразу, если эта очередь пуста, а среда не занята. В противном

случае устройство инициализирует счетчик отсрочки случайной целой величиной, равномерно распределенной на отрезке $[0, CW_r - 1]$, где CW_r называется конкурентным окном (англ.: Contention Window), а индекс r говорит о номере попытки передачи. С каждой неудачной попыткой окно увеличивается, пока не достигнет максимального значения CW_{max} или пока пакет не будет отброшен из-за достижения предельного числа попыток передачи (англ.: Retry Limit, RL):

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

После каждого промежутка времени T_e , в течение которого канал свободен, счетчик отсрочки уменьшается на единицу. При этом счетчик замораживается, пока канал занят, а также на время $AIFS$ (англ.: Arbitration Interframe Space) после его освобождения. Попытка передачи осуществляется, когда счетчик обнуляется. В качестве подтверждения успешного получения кадра, принимающее устройство спустя время $SIFS$ (англ.: Short Interframe Space) передает служебный кадр ACK (англ.: acknowledgment). Если же отправляющая станция не получила ACK в течение промежутка времени $AckTimeout$, то попытка передачи считается неудачной.

Для приоритизации трафика 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, соответствующих определенной категории, устройство Wi-Fi имеет отдельную очередь. У разных очередей имеются свои параметры доступа к каналу: CW_{min} , CW_{max} , $AIFSN$ и TXOP Limit. $AIFSN$ — целое число от 1 до 15, определяющее величину $AIFS = SIFS + T_e \cdot AIFSN$. Параметр TXOP Limit ограничивает максимальное время, на которое станция может занять канал. В стандарте определены значения данных параметров по умолчанию для всех категорий доступа, однако точка доступа сети может менять их на своё усмотрение. Такой способ приоритизации позволяет уменьшить среднюю задержку и в среднем давать больше канальных ресурсов выделенным категориям трафика, реализуя относительную приоритизацию трафика. Стоит отметить, что для приложений реального времени, имеющих очень строгие требования к качеству обслуживания, такая приоритизация трафика может быть недостаточной и может быть необходимо предоставление абсолютного приоритета относительно других типов трафика.

Если устройства передают кадры больших размеров, оказывается эффективным использование механизма RTS/CTS. При использовании данного механизма перед тем, как начать передачу данных, устройство отправляет служебный кадр RTS (англ.: Request-to-Send), запрашивающий передачу, и ждет в ответ кадр CTS (англ.: Clear-to-Send), разрешающий передачу, и только после получения CTS станция передаёт кадр данных. Такой механизм сокращает задержку, так как кадры RTS и CTS короткие и, следовательно, попадание в коллизию двух кадров RTS занимает меньше времени, чем коллизия длинных кадров с данными.

Также стоит упомянуть важный механизм виртуальной занятости среды. Во многих кадрах, в том числе в кадрах данных, RTS и CTS, имеется поле Duration, в которое устройство записывает, в течение какого времени после данного кадра среда будет виртуально занята. Получив такой кадр устройство 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.

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

3.2. Многоканальный доступ

Одно из главных нововведений Wi-Fi 7 — это встроенная поддержка работы устройства в нескольких частотных каналах одновременно (англ.: Multi-Link Operation, MLO), которая должна не только повысить скорость передачи данных, но и снизить задержки. В стандарте 802.11be вводится понятие многоканального устройства (англ.: Multi-Link Device, MLD). Для доступа к беспроводной среде MLD имеет несколько физических интерфейсов, которые объединены в один логический. Таким образом, MLD рассматривается как несколько отдельных станций Wi-Fi в рамках доступа к каналу, и как одно устройство с точки зрения протоколов более высокого уровня.

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

3.3. Сценарий и постановка задачи

В работе рассматриваются несколько пересекающихся сетей Wi-Fi, в которых работает заданное число станций, поддерживающих многоканальный доступ. N станций (далее *обычные станции*) генерируют несрочный насыщенный трафик, т.е. в очереди на передачу всегда имеются кадры. M станций (далее *RTA-станции*) обслуживают приложения реального времени и генерируют ненасыщенный трафик: после отправки пакета новый пакет генерируется через случайное время, распределённое экспоненциально со средним T_{avg} . По умолчанию, срочный трафик относится к категории Voice, а обычный к категории Best effort (таблица 1). RTA-станции передают кадры одинакового размера. Длительность успешной передачи RTA-станции складывается из длительностей кадра данных, кадра подтверждения и при необходимости кадров RTS/CTS: $T_{RTA} = (RTS + SIFS + CTS + SIFS) + T_{data} + SIFS + ACK$, где 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 $T_{data}^{max} + AckTimeout$ в противном случае, где T_{data}^{max} — длительность наибольшего кадра, вступающего в коллизию. Сигнально-кодовая конструкция выбирается достаточно надёжной, что позволяет пренебречь потерями пакетов из-за случайного шума.

Сети Wi-Fi используют 4 канала шириной по 80 МГц. Будем характеризовать качество обслуживания RTA-трафика как 0,99999-квантиль задержки при передаче пакетов RTA. Для выполнения требований к качеству обслуживания RTA-трафика требуется, чтобы 0,99999-квантиль задержки не превышал заданного ограничения. Также определим эффективность

использования канала обычными станциями как долю времени, в течение которого обычные станции успешно передают полезные данные. Далее в разделе 3.4 будут описаны четыре метода совместного использования множества каналов с целью обеспечить выполнение требования на качество обслуживания RTA-трафика и максимизировать эффективность использования беспроводной среды обычными станциями. Задача работы заключается в сравнении данных методов. 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.

3.4. Методы разделения каналов

Рассмотрим четыре метода использования четырех каналов по 80 МГц для обслуживания N обычных (non-RTA) и M RTA-устройств (рис. 3.4). Каждый подход должен обеспечить приоритизацию срочного трафика перед обычным. Чтобы уменьшить влияние коллизий на задержку, в случае, когда кадры срочных данных достаточно большие, используется механизм RTS/CTS.

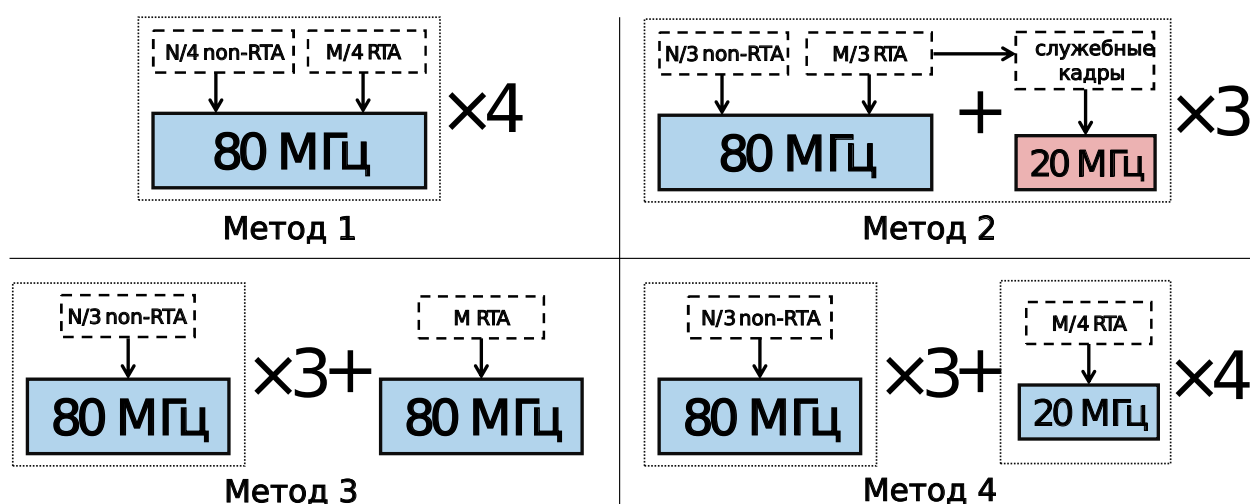


Рис. 1. Схемы исследуемых методов распределения частотных ресурсов

В методе 1 устройства равномерно распределяются по четырем каналам вне зависимости от типа трафика, т.е. механизм TID-to-link mapping используется в режиме по умолчанию. В каждом канале обслуживается трафик от $N/4$ обычных станций и RTA-трафик от $M/4$ станций. В этом случае при стандартных параметрах EDCA задержка передачи кадра от RTA-станции будет связана, в первую очередь, с конкуренцией за канал с обычными станциями. В рамках данного метода выделяется отдельная категория доступа для трафика, чувствительного ко времени. Для того, чтобы гарантировать выигрыш за доступ к каналу на фоне менее срочного трафика, минимальный и максимальный размеры конкурентного окна для RTA-станций, а также значение параметра $AIFSN$ для обычных и RTA-станций выставляются следующим образом:

$$CW_{max}^{RTA} = CW_{min}^{RTA} \leq \min\{AIFSN_{non-RTA} - AIFSN_{RTA}\}.$$

Если при поступлении нового срочного кадра канал свободен, задержка равна времени передачи данных. В противном случае, добавляется время ожидания окончания чужой передачи. Чтобы его уменьшить, для категории доступа, соответствующей трафику, не чувствительному ко времени, устанавливается низкий TXOP Limit. Таким образом, для сокращения задержки

одном канале, а эффективность обычных станций может снижаться из-за того, что один канал ими не используется.

Метод 4 отличается от предыдущего тем, что для трафика RTA выделяется не один канал шириной 80 МГц, а четыре по 20 МГц. При использовании данного метода эффективность использования канала обычными станциями не изменится по сравнению с использованием метода 3, но теперь в одном узком канале будут передавать $M/4$ станций, что уменьшит задержку, связанную с конкуренцией. Однако из-за сужения канала, длительность передачи срочных пакетов увеличится в четыре раза. Задержка вырастет не только из-за меньшей скорости передачи данных, но и из-за более длительного ожидания окончания чужих передач. В рамках метода учитывается, что чувствительность такого узкого канала будет на 6 дБ выше. Это позволит выбрать более быструю сигнально-кодировую конструкцию (СКК), не уменьшая надежность передачи. Если в канале 80 МГц передаются кадры с модуляцией QPSK или 16-QAM, то в канале 20 МГц СКК может быть в 2 раза быстрее. Следовательно, по сравнению с предыдущими подходами время передач кадров RTA в методе 4 больше примерно в два раза.

Стоит отметить, что в отличие от остальных описанных методов, для выполнения требований к качеству обслуживания RTA-трафика метод 1 требует настройки параметров доступа к каналу для разных категорий доступа. Особенное значение имеет параметр TXOP Limit. Для конкретных сценариев с заданными интенсивностью RTA-трафика и требованиями его обслуживания можно найти оптимальное значение TXOP Limit, решив следующую оптимизационную задачу [14]:

$$\begin{cases} E(\text{TXOP Limit}) \Rightarrow \max \text{ по TXOP Limit}; \\ Q(\text{TXOP Limit}) \leq D_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь E — средняя эффективность, которая считается как доля времени, когда передаются полезные данные обычными станциями. Квантиль задержки Q равен времени, за которое кадр будет доставлен с вероятностью 0,99999. С увеличением TXOP Limit задержка и эффективность монотонно возрастают, значит, для заданного требования на максимальную задержку $D_{\max}$ достаточно решить уравнение $Q(\text{TXOP Limit}) = D_{\max}$.

Также в методе 1 для уменьшения задержки из-за конкуренции с другими RTA-станциями размер окна выбирается не меньше, чем число устройств данной категории в канале, т.е. $CW_{\min}^{\text{RTA}} \geq M/4$.

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ

Для сравнения методов рассмотрим сценарий с $N = 36$ обычными станциями и $M = 12$ RTA-станциями. Будем сравнивать разные сценарии по 0,99999-квантилю задержки при передаче кадров RTA, который показывает, с какой максимальной задержкой доставляются пакеты с заданной вероятностью. Также для оценки эффективности обычных станций рассматривается доля времени, в течение которого передаются их полезные данные. Причем эта величина нормирована на значение эффективности в случае равномерного распределения обычных станций по доступным каналам и отсутствия в сети RTA-устройств.

В данном сценарии предполагается, что все станции находятся в зоне видимости друг друга, а используемые СКК являются достаточно надёжными и потерей кадров из-за случайного шума в канале можно пренебречь — кадры могут теряться только из-за коллизий.

В первую очередь рассмотрим сценарий со стандартными значениями параметров EDCA. На рис. 3 приведены графики квантиля задержки и эффективности для случая стандартных значений параметров EDCA и равномерного распределения станций по каналам. То есть в одном канале 80 МГц конкурируют 3 устройства с трафиком категории Voice и 9 категории Best effort (табл. 1). Рассматриваются случаи, когда длительность RTA-пакетов в канале

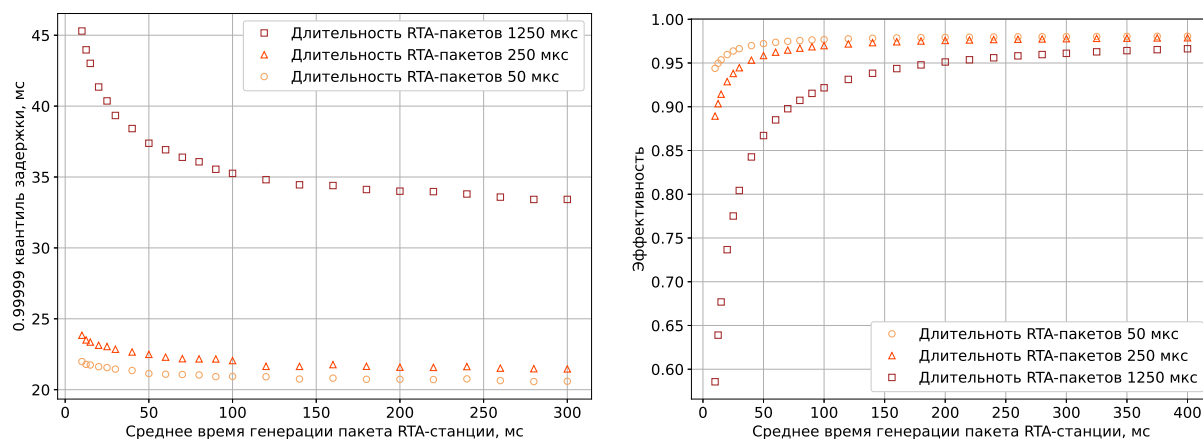


Рис. 3. Зависимости квантиля задержки и эффективности использования канала от среднего времени генерации RTA-пакета при использовании стандартных значений параметров доступа (табл.1).

80 МГц составляет 50 мс, 250 мс и 1250 мс. В случаях 250 мс и 1250 мс используется механизм RTS/CTS, а в случае 50 мс — нет, так как передача достаточно короткая. При стандартных значениях параметров EDCA срочный трафик оказывается недостаточно приоритетным, так как станции RTA могут проиграть соревнование за канал по счетчику отсрочки. Из-за этого даже при большом значении среднего времени генерации RTA-пакетов, квантиль задержки оказывается выше 20 мс, а в случае длинных пакетов выше 30 мс. В таких условиях требования к качеству обслуживания приложений реального времени не могут быть выполнены. Более того, при высокой интенсивности срочного трафика эффективность обычных устройств может значительно упасть из-за большой доли канального времени, которую отнимают передачи данных RTA. Таким образом, применение стандартных параметров доступа к каналу и увеличение числа доступных каналов без каких-либо дополнительных механизмов не позволяет обслуживать трафик RTA.

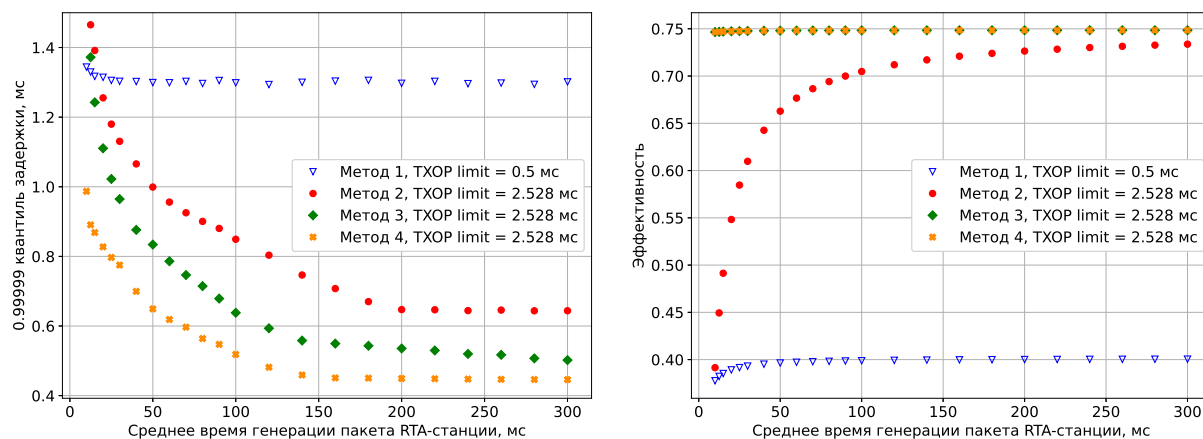


Рис. 4. Зависимости квантиля задержки и эффективности от среднего времени генерации RTA-пакета длительностью 50 мкс (механизм RTS/CTS не используется).

Перейдем к описанным в разделе 3.4 методам разделения канала между станциями. Сначала рассмотрим сценарий с короткими пакетами RTA (рис. 4), в котором время передачи кадра данных RTA в канале 80 МГц занимает 50 мкс. В этом случае механизм RTS/CTS не использу-

ется, поэтому методы 3 и 4 имеют меньший квантиль по сравнению с методом 2, на задержку которого влияет время передачи служебных кадров. В то же время, увеличение длительности передачи кадра RTA в два раза в методе 4 по сравнению с методом 3 вносит меньший вклад во время обслуживания, чем конкуренция между всеми 12 станциями в методе 3, поэтому стоит отдать предпочтение методу 4. Метод 1 для коротких кадров RTA 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. Этот подход может оказаться полезен только при высокой интенсивности RTA-потока, но в этом случае обычный трафик будет почти полностью вытеснен, т.е. большую часть времени все четыре канала будут заняты обслуживанием приложений реального времени.

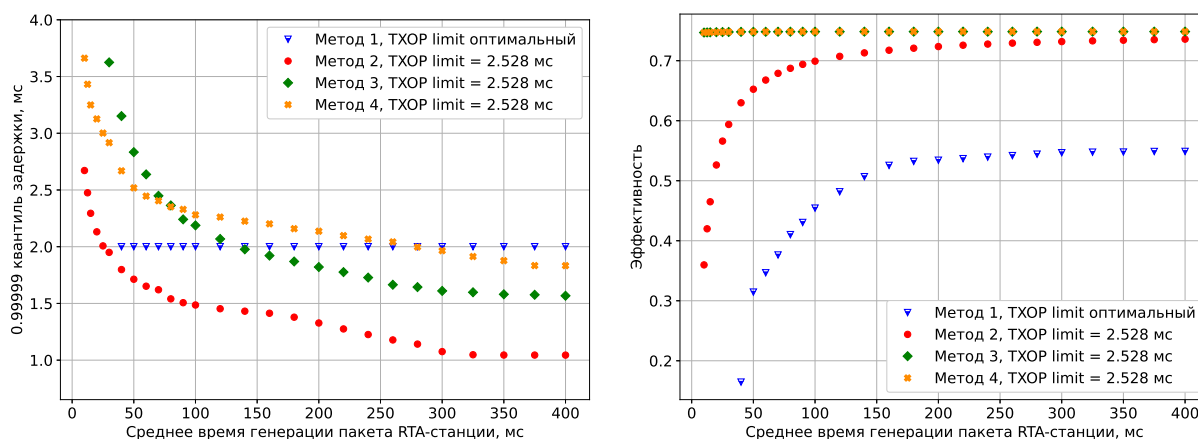


Рис. 5. Зависимости квантиля задержки и эффективности от среднего времени генерации RTA-пакета длительностью 250 мкс.

Рассмотрим далее RTA-кадры длиной 250 мкс в канале 80 МГц (рис. 5). Пусть зафиксирована максимальная задержка передачи RTA-кадров $D_{max} = 2$ мс, тогда при среднем времени между пакетами RTA менее 150 мс ни метод 3, ни метод 4 не достигают необходимого значения квантиля. Для сравнения остальных подходов в методе 1 определяется оптимальное для $D_{max} = 2$ мс значение TXOP Limit при каждом значении интенсивности RTA-трафика. Полученные величины TXOP Limit меньше 0,7 мс, причем для потока RTA более 50 кадров/с не удастся выбрать оптимальное ограничение, чтобы оставалось время на подтверждение получения пакетов. Таким образом, использование метода 2 по сравнению с методом 1 дает выигрыш в эффективности более 30% в случае редкого RTA-трафика и до 200% при высокой интенсивности. Такой результат связан с тем, что требования на задержку достаточно строгие, из-за чего необходимо значительно ограничивать TXOP Limit, что, в свою очередь, существенно снижает эффективность обычных устройств. В методе 2 на эффективность влияет только неиспользование четвертого канала для передачи полезных данных и отнимаемое RTA-передачами канальное время. Сравнение методов 3 и 4 показывает, что при высокой интенсивности снижение конкуренции с помощью разделения 12 станций по 4 узким каналам сокращает задержку, а вот для редкого RTA-трафика больший вклад вносит увеличение длительности передачи данных, поэтому эффективнее оказывается метод 3.

Рассмотрим большие RTA-кадры длительностью 1250 мкс в канале 80 МГц (графики представлены на рис. 6). Для метода 1 выбрано значение TXOP Limit = 1 мс, что делает его примерно равнозначным с методом 2. Однако в области высокой интенсивности метод 1 выигрывает и в эффективности, и в квантиле задержке. Это вызвано тем, что большие частые

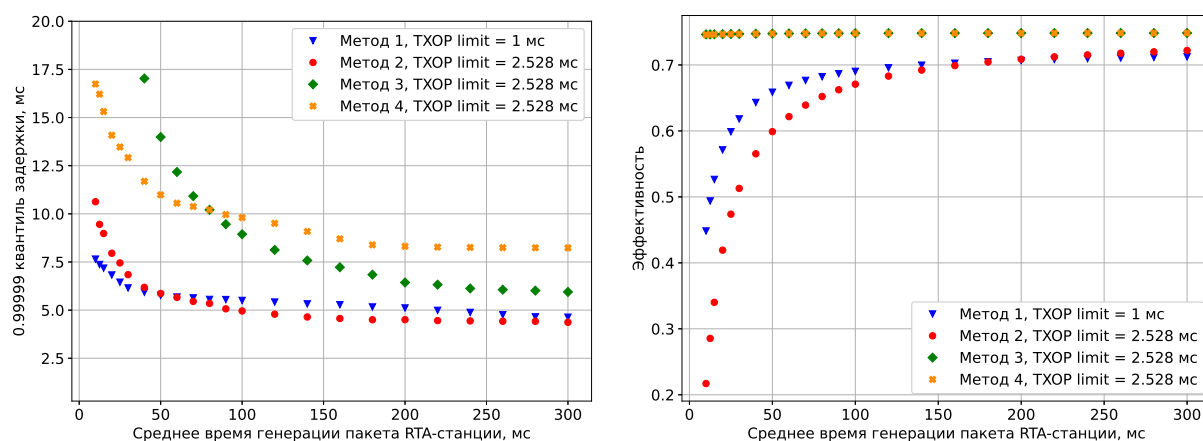


Рис. 6. Зависимости квантиля задержки и эффективности от среднего времени генерации RTA-пакета длительностью 1250 мкс.

кадры увеличивают задержку, связанную с ожиданием окончания передачи других RTA-станций. Уменьшить ее удастся в методе 1 использованием всех четырех каналов для передачи данных. Анализ методов 3 и 4 совпадает со случаем средних RTA-кадров, но в данном сценарии величина квантиля задержки выше и обслуживать трафик приложений реального времени такие подходы могут только при низкой интенсивности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследован ряд методов распределения частотных ресурсов с целью эффективного обслуживания приложений реального времени в сетях Wi-Fi с использованием многоканального доступа. С помощью имитационного моделирования показано, что при стандартных параметрах доступа система не может гарантировать низкую задержку. Также с помощью модели 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.

В случае редкого потока коротких кадров, чувствительных ко времени, наиболее эффективным является выделение отдельного канала для их обслуживания. Причем в случае немного более интенсивного срочного трафика снизить задержку может распределение устройств по нескольким узким каналам. Для длинных передач станциями, обслуживающими приложения реального времени со строгими ограничениями на задержку, необходимо использовать другие подходы, такие как приоритизация трафика с помощью изменения параметров доступа к среде и ограничения несрочных передач по времени или выделение одного из доступных каналов в качестве служебного, чтобы уведомлять в нем обычные устройства о наличии срочных кадров в очереди на передачу. В сценарии с промежуточными значениями длины срочных пакетов последний метод может давать значительный выигрыш в спектральной эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Finn Norman. Introduction to time-sensitive networking // IEEE Communications Standards Magazine. — 2018. — Vol. 2, no. 2. — P. 22–28.
2. IEEE 802.11 Real Time Applications TIG Report. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-2009-06-0rta-report-draft.docx>.
3. Khorov Evgeny, Levitsky Ilya, Akyildiz Ian F. Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7 // IEEE Access. — 2020.

4. Enabling Low Latency Communications in Wi-Fi Networks / Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, and Sandal Mark // Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on / IEEE. — 2018. — P. 1–5.
5. Enabling real-time applications in Wi-Fi networks / Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, and Sandal Mark // International Journal of Distributed Sensor Networks. — 2019. — Vol. 15, no. 5.
6. Approach to Real-Time Communications in Wi-Fi Networks / Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, and Sandal Mark // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2019. — Vol. 64, no. 8. — P. 880–889.
7. Rentschler Markus, Laukemann Per. Performance analysis of parallel redundant WLAN // Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA 2012). — 2012. — P. 1–8.
8. An enhanced MAC to increase reliability in redundant Wi-Fi networks / Cena Gianluca, Scanzio Stefano, Valenzano Adriano, and Zunino Claudio // 2014 10th IEEE Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2014). — 2014. — P. 1–10.
9. Genc Eda, Del Carpio Luis Felipe. Wi-Fi QoS Enhancements for Downlink Operations in Industrial Automation Using TSN // 2019 15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS) / IEEE. — 2019. — P. 1–6.
10. Adame Toni, Carrascosa-Zamacois Marc, Bellalta Boris. Time-Sensitive Networking in IEEE 802.11be: On the Way to Low-Latency WiFi 7 // Sensors. — 2021. — Vol. 21, no. 15. — Access mode: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/15/4954>.
11. Levitsky Ilya, Okatev Yaroslav, Khorov Evgeny. Study on Simultaneous Transmission and Reception on Multiple Links in IEEE 802.11be networks // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En T). — 2020. — P. 1–4.
12. AP Coordination and Full-duplex enabled Multi-band Operation for the Next Generation WLAN: IEEE 802.11be (EHT) / Yang Mao, Li Bo, Yan Zhongjiang, and Yan Yuan // 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). — 2019. — P. 1–7.
13. Naik Gaurang, Ogbe Dennis, Park Jung-Min Jerry. Can Wi-Fi 7 Support Real-Time Applications? On the Impact of Multi Link Aggregation on Latency // Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Xiamen, China. — 2021. — P. 28–30.
14. Bankov Dmitry, Chemrov Kirill, Khorov Evgeny. Tuning Channel Access to Enable Real-Time Applications in Wi-Fi 7 // 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) / IEEE. — 2020. — P. 20–25.

On the Usage of Multilink Access Methods for Service of Real-Time Applications in Wi-Fi Networks

D.V. Bankov, A.I. Lyakhov, E.M. Khorov, K.S. Chemrov

Serving real-time applications, such as virtual and augmented reality, remote control and video streamin, is an important use case for next-generation Wi-Fi networks. To achieve it, the currently developed IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) standard introduces several new features that can guarantee low latency. One of such innovations is the support for the simultaneous transmission and reception of information by a device in multiple frequency channels or multi-link, which will enable more flexible usage of channel resources and mapping of different kinds of traffic to different channels. In this work, we study various methods of multilink transmissions to serve the real-time traffic along with delay-insensitive traffic. Compared approaches are based on a separate channel for service frames, adjustment of special medium access parameters, and the allocation of a separate channels only for urgent traffic. Obtained results show, that for each method, there is a scenario in which it is optimal in terms of meeting the requirements of real-time applications and the efficiency of simple devices.

KEYWORDS: wireless network, Wi-Fi, multi-link, reliability, low latency, real-time applications.