

Многоканальный планировщик для обслуживания приложений реального времени в сетях Wi-Fi 8 с пространственным повторным использованием радиоресурсов ¹

К.С. Чемров^{*,**}, Д.В. Банков^{*}, А.И. Ляхов^{*}, 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 01.10.2023 г.

Аннотация—Одним из сценариев использования технологии Wi-Fi 8 рассматривается обслуживание приложений реального времени (англ.: Real-Time Applications, RTA), поэтому научное сообщество ищет методы, гарантирующие низкую задержку для RTA-трафика. Координация нескольких точек доступа, ключевая особенность Wi-Fi 8, потенциально полезна для улучшения представленных ранее механизмов обслуживания трафика RTA. Пространственное повторное использование радиоресурсов, введенное в Wi-Fi 6, позволяет устройству передавать кадры с пониженной мощностью одновременно с передачей в другой пересекающейся сети. Кроме того, если устройство поддерживает работу в нескольких каналах, введенную в Wi-Fi 7, оно может уменьшить задержки, получая доступ к первому освободившемуся каналу. Однако часто случается, что при появлении RTA-данных текущие передачи во всех доступных каналах не позволяют использовать пространственное повторное использование или требуют слишком жесткого снижения мощности. Координация между точками доступа может решить эту проблему с помощью совместного составления расписания передач разными точками доступа с учетом требований RTA. В данной работе предлагается многоканальный планировщик, который вдвое уменьшает задержки для устройств с RTA-трафиком и не ухудшает качество обслуживания остального трафика. Разработанный планировщик основан на решении задачи многокритериальной оптимизации и минимизирует задержки в худшем случае за счет обеспечения возможности повторного пространственного использования радиоресурсов двух каналов. Для этого планировщик использует быстрый жадный алгоритм, который по результатам имитационного моделирования оказался не хуже полного перебора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: беспроводная локальная сеть, Wi-Fi 8, планирование радиоресурсов, координация точек доступа, многоканальный доступ, надежность, низкая задержка, приложения реального времени.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_4_545

1. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение низких задержек и высокой надежности в сетях Wi-Fi необходимо для обслуживания приложений реального времени (англ.: Real-Time Applications, RTA), к которым относятся виртуальная и дополненная реальность, удаленное управление, автоматизация производства, облачные игры и т. д. Так, одним из сценарием использования Wi-Fi после 2030 г.

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

являются иммерсивные телекоммуникации, которые требуют, чтобы 99,9% пакетов доставлялись с задержками ниже 20 мс [1].

Обслуживание RTA в сетях Wi-Fi затруднено рядом факторов. Во-первых, сети Wi-Fi используют нелицензируемый диапазон частот, поэтому передачи устройств Wi-Fi часто испытывают интерференцию, из-за которой теряются пакеты. Во-вторых, устройства Wi-Fi используют случайный доступ к каналу, что приводит к большим задержкам, связанным с ожиданием окончания текущих передач и коллизиями [2]. В-третьих, плотность сетей Wi-Fi быстро растет, что приводит к появлению множества перекрывающихся сетей, эффективность которых еще сильнее ухудшается из-за интерференции и конкуренции за доступ к каналу.

Недавно запущенная рабочая группа по разработке стандарта IEEE 802.11bn, также известного как Wi-Fi 8 [1, 3], рассматривает обслуживание RTA как одну из своих целей. Многообещающим подходом для снижения задержек может быть расширение некоторых функций, представленных в Wi-Fi 6 [4, 5] и в Wi-Fi 7 [6–8], с помощью координации нескольких точек доступа, которая является одной из ключевых функций Wi-Fi 8.

Первой из таких функций является представленная в Wi-Fi 6 передача на основе триггер-кадра (Т-передача). Этот механизм позволяет точке доступа отправлять триггер-кадр (Т-кадр) и выделять частотные и временные ресурсы для восходящих передач пользовательских устройств. Т-передачи позволяют избегать конкуренции между устройствами в одной сети, снижая тем самым задержки [9].

Вторая функция — параметризованное пространственное повторное использование радиоресурсов (англ.: Parameterized Spatial Reuse, PSR) [10, 11]. PSR позволяет устройству передавать кадры одновременно с текущей Т-передачей в другой сети. Чтобы разрешить PSR, точка доступа инициирует Т-передачу с помощью Т-кадра, который уведомляет окружающие устройства о возможности использовать PSR. Если устройство хочет использовать предоставленную возможность и совершить PSR-передачу, оно должно ограничить свою мощность в соответствии с информацией в Т-кадре, чтобы уменьшить свою интерференцию с Т-передачей в другой сети. PSR значительно уменьшает задержку, связанную с ожиданием окончания текущей передачи, что делает механизм потенциально полезным для обслуживания RTA [10].

Третья функция, поддержка многоканального доступа, была введена в Wi-Fi 7. Устройство Wi-Fi является многоканальным, если имеет несколько физических интерфейсов для приема и передачи данных, которые объединены в один логический. Такое устройство может работать в нескольких частотных каналах одновременно, что открывает ряд возможностей для улучшения качества обслуживания RTA. Так, множество исследований показывает, что многоканальное устройство может снизить задержки доступа к каналу [12–17]. Кроме того, в [18, 19] разработан метод обслуживания RTA с использованием одного из доступных каналов в качестве служебного для запроса срочного доступа к каналу. Улучшить качество обслуживания RTA позволяет и дублирование пакетов в нескольких каналах, а также разделение каналов по типу трафика. В работе [20] проводится сравнение упомянутых выше подходов к снижению задержки и повышению надежности с помощью многоканального доступа.

Эффективность расширения первых двух механизмов, Т-передач и PSR, с помощью координации между точками доступа была показана в [21, 22]. В частности, в [21] был разработан алгоритм взаимодействия точек доступа двух пересекающихся сетей, который позволяет планировать Т-передачи для устройств с нечувствительным к задержке трафиком так, чтобы как можно чаще давать возможность совершать PSR-передачи RTA-устройствам. Улучшение этого алгоритма с помощью многоканального доступа не рассматривалось ранее. С одной стороны возможность работы в нескольких каналах существенно снижает задержки. С другой стороны, если RTA-устройства являются многоканальными, то необходимо решать более сложную задачу совместного планирования Т-передач в нескольких каналах. В данной работе

предлагается подход к многоканальному планированию радиоресурсов, который, по сравнению с классическим планировщиком, основанным на равном использовании канального времени, (англ.: Airtime fairness), уменьшает задержки для многоканальных RTA-устройств без ухудшения пропускной способности и справедливости распределения ресурсов для устройств с нечувствительным к задержкам трафиком.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В Разделе 2 описывается рассматриваемый сценарий и формулируется задача. Раздел 3 содержит предлагаемый подход к планированию, для чего ставится и решается жадным методом задача оптимизации. В Разделах 4 и 5 приводятся численные результаты и заключение, соответственно.

2. СЦЕНАРИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим две пересекающиеся сети Wi-Fi, развернутые в одном диапазоне частот.

Первая сеть (далее *обычная сеть*) состоит из точки доступа, которая является многоканальным устройством, и N пользовательских одноканальных устройств. Трафик, который генерируется в сети, является нечувствительным к задержкам. Все восходящие передачи в обычной сети инициируются T-кадром, что помогает повысить пропускную способность, за счет уменьшения коллизий.

Вторая сеть (далее *RTA-сеть*) состоит из точки доступа и M RTA-устройств, которые генерируют восходящий RTA-трафик. Все устройства в сети являются многоканальными, т.е. точка доступа может принимать данные одновременно от нескольких RTA-устройств, а RTA-устройства прослушивают два канала и могут совершать передачу в первом освободившемся канале. Точка доступа сразу знает о появлении данных для нисходящей передачи и может получить доступ к каналу с высоким приоритетом, поэтому обслуживать нисходящий RTA-трафик не так сложно, как восходящий. По этой причине в работе рассматривается только восходящий пользовательский трафик в RTA-сети. Чтобы использовать T-передачи, точке доступа необходимо знать о наличии данных для передачи на пользовательских устройствах. Если трафик случайный, то при появлении данных на передачу устройства передают специальный кадр с информацией о состоянии буфера. В случае обслуживания RTA-трафика это может вызывать дополнительные задержки, поэтому в RTA-сети не используется механизм T-передач.

Точка доступа обычной сети разрешает PSR во время некоторых T-передач. Кроме того, некоторые T-передачи могут разрешать PSR-передачи только с ограничением мощности, слишком строгим для успешной доставки RTA-данных. Назовем обычные устройства PSR-благоприятными для RTA-устройства, если во время их T-передач разрешен PSR и ограничения мощности существенно не снижают надежность передачи этого RTA-устройства. В противном случае, если обычное устройство допускает только ненадежную одновременную передачу или даже запрещает PSR, назовем ее PSR-неблагоприятной для этого RTA-устройства. Стоит обратить внимание, что эффективность уменьшения задержки с помощью PSR зависит от количества и частоты планирования PSR-благоприятных устройств в доступных для RTA-сети каналах. Также заметим, что механизм PSR не разрешает передавать одновременно с нисходящими передачами.

Если точки доступа в пересекающихся сетях не имеют координации, то точка доступа обычной сети не знает об RTA-устройствах в соседней сети и не знает, какие обычные устройства PSR-благоприятны для них. В таком случае точка доступа использует планировщик по умолчанию, например, Airtime fairness, который в среднем выделяет одинаковое время передачи для каждого устройства [23]. По этой причине точка доступа обычной сети может планировать передачи PSR-неблагоприятных устройств несколько раз подряд, что может привести к большим задержкам передачи RTA-данных.

Если точки доступа будут поддерживать Wi-Fi 8, то смогут быть скоординированы для улучшения алгоритмов планирования. В частности, как описано в [21], точки доступа классифицируют обычные устройства на PSR-благоприятные и PSR-неблагоприятные для каждого RTA-устройства следующим образом. Точка доступа обычной сети сообщает точке доступа RTA-сети допустимый уровень интерференции для каждого устройства, которое разрешает PSR. Затем точка доступа RTA-сети измеряет уровень мощности приема от каждого обычного устройства и вычисляет ожидаемое отношение сигнала к шуму и интерференции (англ.: signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) для рассматриваемого RTA-устройства при PSR-передаче, предоставляемой во время T-передачи каждого обычного устройства. Обычное устройство считается PSR-благоприятным для выбранного RTA-устройства, если ожидаемая величина SINR больше, чем некоторое пороговое значение $SINR_{th}$. Наконец, точка доступа RTA-сети сообщает точке доступа обычной сети список PSR-благоприятных устройств для каждого RTA-устройства.

Чтобы RTA-сеть могла обслуживать RTA-трафик, необходимо доставлять кадры данных в пределах заданного ограничения на задержку. Одновременно с этим обычной сети важно обеспечить максимально возможную пропускную способность и справедливое распределение ресурсов. Таким образом, в работе ставится задача разработать алгоритм для многоканальной точки доступа обычной сети, который распределяет одноканальные пользовательские устройства по доступным каналам и совместно для этих каналов планирует восходящие передачи. Алгоритм должен уменьшить Q-квантиль задержки передачи RTA-данных и не ухудшить среднюю пропускную способность и справедливость распределения ресурсов в обычной сети.

3. АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ РАДИОРЕСУРСОВ

В данной работе предлагается подход к планированию передач, который решает поставленную в Разделе 2 задачу.

Во-первых, необходимо гарантировать справедливость распределения ресурсов для обычных пользовательских устройств. Для этого планировщик поровну распределяет обычные устройства по двум каналам и определяет для каждого канала порядок, в котором устройства должны совершать передачи. Далее, точка доступа циклически повторяет выделение ресурсов в каждом из каналов в порядке, определенном для соответствующего канала. Таким образом, за один цикл каждое обычное устройство передает ровно один раз.

Во-вторых, необходимо уменьшить Q-квантиль задержки для RTA-устройств. Для этого планировщик минимизирует задержку доступа к каналу в худшем случае. Среди всех возможных распределений обычных устройств по каналам и порядков их передач планировщик находит такое распределение и порядки, при которых благоприятные для PSR передачи хотя бы в одном канале происходят часто.

В Разделе 3.1 формулируется задача оптимизации для нахождения распределения обычных устройств по каналам и порядков их передач. В Разделе 3.2 предлагается жадный алгоритм для решения оптимизационной задачи.

3.1. Оптимизационная задача

Формализуем поставленную в Разделе 2 задачу. Для характеристики обычного устройства i будем использовать вектор $\mathbf{f}_i = \{f_{ij}\}_{j=1}^M$, $i \in 1..N$, который определяется следующим образом. Если обычное устройство i является PSR-благоприятным для RTA-устройства j , то $f_{ij} = 1$. В противном случае $f_{ij} = 0$.

Будем считать, что используемые каналы относятся к одному диапазону частот, например, 5 ГГц, поэтому распространение сигнала и уровень интерференции между устройствами мож-

но считать одинаковым в обоих каналах. Следовательно, PSR-благоприятные устройства в одном канале, будут PSR-благоприятны и во втором, т. е. их векторы \mathbf{f}_i будут совпадать для двух каналов. Пусть все N устройств $\{i_1, i_2, \dots, i_N\}$ активны, т. е. имеют пакеты в очереди на передачу, и планировщик распределил их по двум доступным каналам. Чтобы описать порядок передач обычных устройств в каждом канале за один цикл, составим две матрицы \mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2 из векторов \mathbf{f}_i таким образом, чтобы их порядок соответствовал порядку, в котором запланированы передачи устройств. Например, если планировщик определил в первом канале порядок передач $[i_1, i_2, \dots, i_n]$, а во втором — $[i_{n+1}, i_{n+2}, \dots, i_N]$, то матрицы будут иметь следующий вид: $\mathbf{F}_1 = [\mathbf{f}_{i_1} | \mathbf{f}_{i_2} | \dots | \mathbf{f}_{i_n}]$, $\mathbf{F}_2 = [\mathbf{f}_{i_{n+1}} | \mathbf{f}_{i_{n+2}} | \dots | \mathbf{f}_{i_N}]$, где $[\mathbf{A} | \mathbf{B}]$ обозначает конкатенацию матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} .

Пусть $Z_i(\mathbf{F})$ — максимальное количество последовательных нулей в i -й строке циклически повторяющейся матрицы $[\dots | \mathbf{F} | \mathbf{F} | \mathbf{F} | \dots]$. Например, значение $Z_i(\dots)$ для строки $(0, 1, 0, 1, 0, 0)$ равно 3. Заметим, что вместо $[\dots | \mathbf{F} | \mathbf{F} | \mathbf{F} | \dots]$ достаточно рассматривать только $[\mathbf{F} | \mathbf{F}]$.

Если строка i в матрице \mathbf{F}_1 содержит k последовательных нулей, RTA-устройство i не может выполнить PSR-передачу в первом канале в течение k T-передач. Если $Z(\mathbf{F}_1) = k$ и $Z(\mathbf{F}_2) = k$, то в худшем случае, когда k последовательных нулей совпадают по времени в двух каналах, RTA-устройство i не может выполнить PSR-передачу в течение k T-передач ни в одном из доступных каналов. В таком случае задержки могут достигать длительности k обычных передач. Таким образом, чтобы минимизировать задержки доступа к каналу в худшем случае для RTA-устройства i , необходимо минимизировать $\min\{Z_i(\mathbf{F}_1), Z_i(\mathbf{F}_2)\}$ по всем возможным распределениям векторов \mathbf{f}_i по двум матрицам и всем возможным перестановкам столбцов внутри каждой матрицы. Будем обозначать все эти распределения и перестановки как $P\{\mathbf{f}_i\}$.

Не всегда возможно найти распределения и перестановки, оптимальные для всех RTA-устройств. Можно сформулировать задачу минимизации $\max_{i \in 1..M} \min\{Z_i(\mathbf{F}_1), Z_i(\mathbf{F}_2)\}$ по всем $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2 \in P\{\mathbf{f}_i\}$. Однако если несколько перестановок дают одно и то же значение максимума, следует минимизировать максимум среди остальных станций. Если они также равны для нескольких перестановок, нужно минимизировать следующий максимум и т. д. Пусть $S(\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2)$ — вектор значений $\{\min\{Z_i(\mathbf{F}_1), Z_i(\mathbf{F}_2)\}\}_{i=1}^M$, отсортированный в порядке убывания. Рассмотрим $S(\mathbf{F})$ как многокритериальную целевую функцию и сформулируем задачу лексикографической оптимизации:

$$S(\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2) \rightarrow \underset{\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2 \in P\{\mathbf{f}_i\}}{\text{lex min}} \quad (1)$$

Данную задачу можно решить методом полного перебора. Однако сложность такого решения $\mathcal{O}(M \times N!)$, поэтому в Разделе 3.2 предлагается быстрый жадный алгоритм решения задачи (1).

3.2. Жадный алгоритм

Предлагаемый жадный алгоритм можно разделить на два этапа. Сначала векторы произвольным образом делятся на две части. Из первой части векторов формируется матрица для первого канала, а из второй — матрица для второго канала. Далее рассматриваются все возможные попарные обмены столбцов между матрицами. Обмен столбцов производится, если в результате него уменьшается многокритериальная целевая функция $S(\dots)$ для текущих матриц.

Опишем жадный алгоритм более подробно. Алгоритм принимает на вход набор векторов активных станций $\{\mathbf{f}_i\}_{i=1}^N$ и на выходе возвращает жадно-оптимальные последовательности векторов для двух каналов в виде матриц \mathbf{F}_1^* , \mathbf{F}_2^* .

На первом этапе матрицы для каждого канала формируются жадным образом. на этапе заполнения одного канала, алгоритм принимает на вход набор векторов и возвращает жадно-

оптимальную последовательность этих векторов в виде матрицы \mathbf{F}^* . Результирующая матрица \mathbf{F}^* инициализируется объединением двух первых векторов. Далее перебираются оставшиеся векторы, и для каждого вектора определяется место в матрице \mathbf{F}^* .

1. Для очередного вектора \mathbf{f}_i создаётся матрица \mathbf{T}^* , в которой вектор \mathbf{f}_i занимает оптимальное на текущий момент положение. Матрица \mathbf{T}^* инициализируется матрицей \mathbf{F}^* с вектором \mathbf{f}_i , вставленным после столбца 1.
2. Затем перебираются оставшиеся возможные позиции j вектора \mathbf{f}_i в матрице \mathbf{F}^* . Матрица \mathbf{T} хранит копию матрицы \mathbf{F}^* с вектором \mathbf{f}_i , вставленным после столбца j .
3. Так как на данном этапе рассматривается только один канал, введем аналог функции $S(\dots)$ для одного канала. Пусть $S^1(\mathbf{F})$ — вектор значений $\{Z_i(\mathbf{F})\}_{i=1}^M$, отсортированный по убыванию. Если функция $S^1(\dots)$ для \mathbf{T} лексикографически меньше, чем для \mathbf{T}^* , то найдена новая лучшая позиция для вектора \mathbf{f}_i , поэтому \mathbf{T}^* обновляется матрицей \mathbf{T} .
4. Когда все возможные позиции исчерпаны, \mathbf{T}^* хранит матрицу с лучшей позицией вектора \mathbf{f}_i с точки зрения минимизации функции $S^1(\dots)$. В итоге результирующая матрица \mathbf{F}^* обновляется матрицей \mathbf{T}^* , а функция переходит к следующему вектору \mathbf{f}_{i+1} .

Когда все векторы из $\{\mathbf{f}_i\}_{i=1}^n$ исчерпаны, получается матрица \mathbf{F}^* , жадно-оптимальная с точки зрения минимизации функции $S^1(\dots)$.

На втором этапе алгоритм пытается попарно обменивать столбцы матриц \mathbf{F}_1^* и \mathbf{F}_2^* . На этом этапе алгоритм принимает на вход независимо сформированные матрицы \mathbf{F}_1^* и \mathbf{F}_2^* и возвращает матрицы \mathbf{F}_1^* и \mathbf{F}_2^* после перестановок, улучшающих значение целевой функции $S(\dots)$. Перебираются все столбцы матрицы \mathbf{F}_1^* , и для каждого столбца определяется столбец в матрице \mathbf{F}_2^* , обмен с которым уменьшает целевую функцию $S(\dots)$.

1. Для очередного столбца i матрицы \mathbf{F}_1^* создаются \mathbf{T}_1^* и \mathbf{T}_2^* , которые хранят матрицы, полученные в результате оптимального на текущий момент обмена столбцов.
2. Затем перебираются все столбцы j матрицы \mathbf{F}_2^* . \mathbf{T}_1 и \mathbf{T}_2 хранят матрицы, полученные в результате обмена i -го столбца матрицы \mathbf{F}_1^* с j -м столбцом матрицы \mathbf{F}_2^* .
3. Если функция $S(\dots)$ для \mathbf{T}_1 и \mathbf{T}_2 лексикографически меньше, чем для \mathbf{T}_1^* и \mathbf{T}_2^* , то найдена новая лучшая пара для обмена, поэтому \mathbf{T}_1^* и \mathbf{T}_2^* заменяются матрицами \mathbf{T}_1 и \mathbf{T}_2 .
4. Когда все возможные столбцы матрицы \mathbf{F}_2^* исчерпаны, \mathbf{T}_1^* и \mathbf{T}_2^* хранят матрицы, полученные в результате лучшего с точки зрения минимизации функции $S(\dots)$ обмена столбца i матрицы \mathbf{F}_1^* .

Когда все столбцы матрицы \mathbf{F}_1^* исчерпаны, получаем матрицы \mathbf{F}_1^* и \mathbf{F}_2^* , жадно-оптимальные с точки зрения минимизации функции $S(\dots)$.

Сложность лексикографического сравнения векторов размера M составляет $\mathcal{O}(M)$. Поскольку в каждой функции оно выполняется в двойном вложенном цикле по количеству устройств, итоговая сложность жадного алгоритма составляет $\mathcal{O}(M \times N^2)$, что значительно лучше, чем сложность полного перебора.

4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проанализируем эффективность предлагаемого многоканального планировщика с помощью экспериментов в среде имитационного моделирования ns-3 [24]. Уточним сценарий, описанный в разделе 2. Пусть сети Wi-Fi двух квартир на одном этаже многоквартирного дома используют одни и те же пары частотных каналов. Устройства пересекающихся сетей расположены в двух квартирах размером 10×7 метров на расстоянии семи метров друг от друга.

Таблица 1. Параметры экспериментов

Параметр	Описание
Размер обычных пакетов	1000 байт
Размер RTA-пакетов	500 байт
Трафик обычных устройств	насыщенный
Трафик RTA-устройств	периодический
Количество обычных устройств	$N = 8$
Количество RTA-устройств	$M = \{2,4\}$
Количество каналов	2
Ширина одного канала	20 МГц
СКК для RTA-передач	MCS 0
СКК для обычных передач	MCS 8
Количество пространственных потоков	1
Обычный планировщик	Airtime fairness
Мощность точек доступа	20 дБм
Мощность пользовательских устройств	15 дБм
Порог классификации $SINR_{th}$	3 дБм

Соседние квартиры не рассматриваются, так как их сети скорее всего используют разные пары каналов.

Точка доступа обычной сети расположена у правой стены, а $N = 8$ пользовательских устройств случайным образом расставлены внутри квартиры. Считается, что во время эксперимента все обычные устройства имеют насыщенный трафик пакетов размером 1000 байт, которые объединяются и передаются на сигнально-кодовой конструкции (СКК) MCS 8. Для случая, когда насыщенный трафик имеют не все устройства, рассматриваются только те устройства, которые имеют данные на передачу. Точка доступа обычной сети получает доступ к каналу на время ≈ 5 мс и использует первую половину времени для нисходящей передачи, а вторую — для приема восходящей T-передачи.

Точка доступа RTA-сети расположена у левой стены второй квартиры, а внутри квартиры расположены M RTA-устройств, координаты которых фиксируются для каждой конкретной серии экспериментов. RTA-устройства периодически генерируют 500-байтовые пакеты и для достижения высокой надежности используют MCS 0. Параметры имитационного моделирования приведены в Таблице 1.

Были проведены две серии экспериментов. В первой серии экспериментов в RTA-сети $M = 2$ RTA-устройства. В экспериментах варьировался период RTA-трафика и измерялись метрики качества обслуживания для RTA-сети и обычной сети. В качестве алгоритмов планирования обычных T-передач рассматриваются Airtime fairness (обычный планировщик) и два планировщика, учитывающих RTA и основанных на решении задачи (1) полным перебором и жадным методом. Как видно на Рис. 1 (сплошные линии), разработанный планировщик вдвое уменьшает 0,999-квантиль задержки по сравнению с обычным.

В качестве метрик качества обслуживания обычного трафика измерялись средняя пропускная способность и индекс справедливости Джейна [25]. Как видно из Рис. 1, разработанный планировщик не ухудшает среднюю пропускную способность обычной сети, а даже немного увеличивает, поскольку RTA-устройства чаще используют PSR-передачи, потребляя меньше канального времени. Индекс справедливости Джейна по пропускной способности имеет высокое значение ($> 0,99$) для всех рассматриваемых планировщиков, поскольку они по построению гарантируют равное распределение ресурсов между обычными станциями. Неидеальность индекса можно объяснить влиянием PSR-передач RTA-устройств на вероятность приема обычных T-передач.

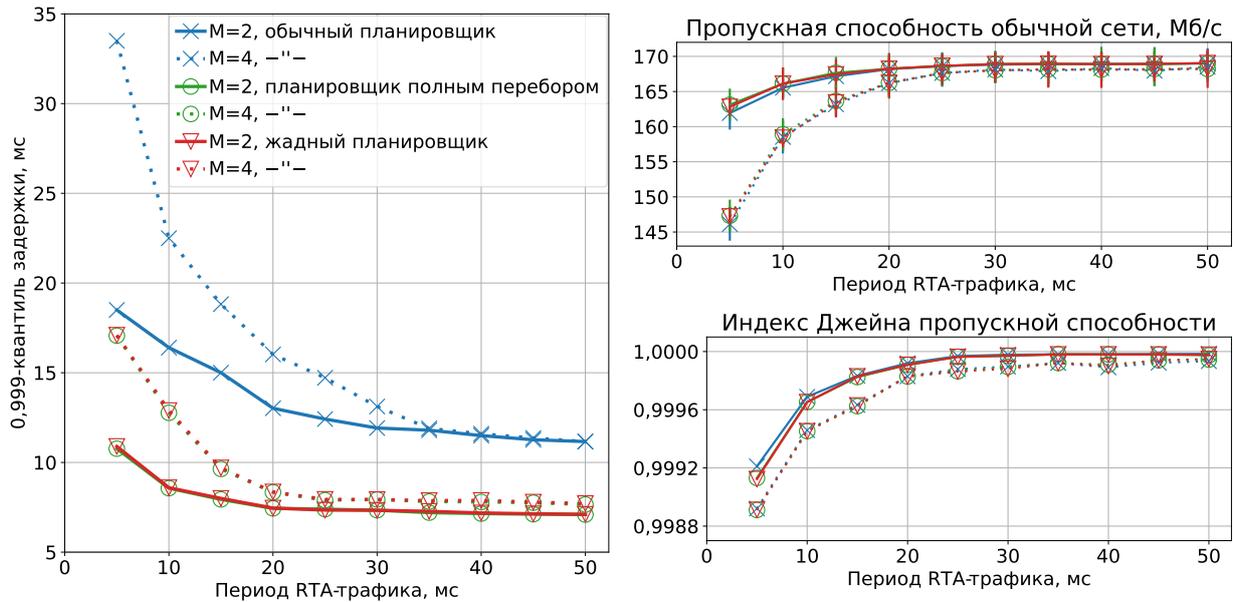


Рис. 1. Зависимость метрик качества обслуживания от периода RTA-трафика.

Во второй серии экспериментов в RTA-сети $M = 4$ RTA-устройства. Были измерены те же метрики качества обслуживания, что и в первой серии (см. Рис. 1, пунктирные линии). В данной серии экспериментов с увеличенным количеством RTA-устройств разработанный планировщик также дает выигрыш в квантиле задержки более чем в два раза. Можно заметить, что при редком RTA-трафике (период более 40 мс), кривые для первой и второй серий экспериментов почти совпадают. Это объясняется тем, что конкуренция между RTA-устройствами оказывает слабое влияние на задержку по сравнению с частотой предоставления возможности совершить PSR-передачу.

Сравним теперь два разработанных планировщика в обеих сериях экспериментов. По всем метрикам кривые для планировщиков, использующих как полный перебор, так и жадный алгоритм не различимы. Таким образом, результаты подтверждают, что хотя жадный алгоритм теоретически не гарантирует оптимальное решение задачи (1), в подавляющем большинстве случаев ему удастся найти лучшее расписание T-передач для обычных станций.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен подход к обслуживанию трафика реального времени, который объединяет перспективные механизмы последних трех поколений технологии Wi-Fi. Рассматриваемая в рамках Wi-Fi 8 координация нескольких точек доступа позволила разработать многоканальный планировщик передач обычных устройств, учитывающий особенности обслуживания RTA в пересекающихся сетях. Предлагаемый планировщик опирается на пространственное повторное использование радиоресурсов и многоканальный метод доступа, введенные в Wi-Fi 6 и Wi-Fi 7, соответственно. В работе также предложен быстрый жадный алгоритм решения задачи минимизации задержки доступа к каналам в худшем случае, который необходим для составления расписания передач в режиме реального времени. Результаты имитационного моделирования показали, что при использовании предложенного планировщика средняя пропускная способность и индекс справедливости пропускной способности для трафика, отличного от RTA, не изменяются по сравнению с обычным планировщиком, но 0,999-квантиль задержки для трафика реального времени сокращается более чем вдвое. Также показано, что

разработанный быстрый жадный алгоритм позволяет решать задачу планирования не хуже, чем методом полного перебора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L.G. Giordano, G. Geraci, M. Carrascosa, and B. Bellalta. What Will Wi-Fi 8 Be? A Primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability. *arXiv preprint arXiv:2303.10442*, 2023
2. K. Chemrov, D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov. Smart Preliminary Channel Access to Support Real-Time Traffic in Wi-Fi Networks. *Future Internet*, 2022, pp. 296.
3. “UHR proposed PAR” <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-2009-06-Orta-rta-report-draft.docx>. Дата обращения: 29-11-2023.
4. B. Bellalta. IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANs. *IEEE Wireless Communications*, 2016, pp. 38046
5. E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi. A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, pp. 197-216.
6. E. Khorov, I. Levitsky, and I.F. Akyildiz. Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7. *IEEE Access*, 2020, pp. 88664-88688.
7. C. Deng, et al. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New challenges and opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, pp. 2136-2166.
8. T. Adame, M. Carrascosa-Zamacois, B. Bellalta. Time-sensitive networking in IEEE 802.11be: On the way to low-latency WiFi 7. *Sensors*, 2021, pp. 4954.
9. M.-T. Suer, P. Jose, and H. Tchouankem. Experimental Evaluation of IEEE 802.11ax - Low Latency and High Reliability with Wi-Fi 6?. *2022 IEEE Global Communications Conference*, 2022, pp. 377-382.
10. E. Rodrigues, A. Garcia-Rodriguez, L.G. Giordano, and G. Geraci. On the Latency of IEEE 802.11ax WLANs with Parameterized Spatial Reuse. *2020 IEEE Global Communications Conference*, 2020, pp. 1-6.
11. F. Wilhelmi, S. Barrachina-Muñoz, C. Cano, I. Selinis, and B. Bellalta. Spatial reuse in IEEE 802.11ax WLANs. *Computer Communications*, 2021, pp. 65-83.
12. M. Yang, B. Li, Z. Yan, and Y. Yan. AP Coordination and Full-duplex enabled Multi-band Operation for the Next Generation WLAN: IEEE 802.11be (EHT). *2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2019, pp. 1-7.
13. G. Naik, D. Ogbe, and J.-M.J. Park. Can Wi-Fi 7 Support Real-Time Applications? On the Impact of Multi Link Aggregation on Latency. *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*, 2021, pp. 1-6.
14. H. Park, and C. You. Latency Impact for Massive Real-Time Applications on Multi Link Operation. *2021 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, 2021, pp. 1-5.
15. G. Lacalle, I. Val, O. Seijo, M. Mendicute, D. Cavalcanti, and J. Perez-Ramirez. Analysis of Latency and Reliability Improvement with Multi-Link Operation over 802.11. *2021 IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2021, pp. 1-7.
16. M. Carrascosa, G. Geraci, E. Knightly, and B. Bellalta. An experimental study of latency for IEEE 802.11be multi-link operation. *ICC 2022-IEEE International Conference on Communications*, 2022, pp. 2507-2512.
17. M. Carrascosa-Zamacois, L. Galati-Giordano, A. Jonsson, G. Geraci, and B. Bellalta. Performance and coexistence evaluation of IEEE 802.11be multi-link operation. *2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2023, pp. 1-6.
18. D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov and M. Sandal. Enabling real-time applications in Wi-Fi networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2019.

19. D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov and M. Sandal. Approach to Real-Time Communications in Wi-Fi Networks. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2019, pp. 880-889.
20. D. Bankov, A. Lyakhov, E. Khorov, and K. Chemrov. On the Use of Multilink Access Methods to Support Real-Time Applications in Wi-Fi Networks. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2021, pp. 1476-1484.
21. K. Chemrov, D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov. Support of Real-Time Applications in Wi-Fi 8 with Multi-Ap Coordinated Parameterized Spatial Reuse. *2023 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2023, pp. 226-231.
22. D. Nunez, M. Smith, and B. Bellalta. Multi-AP Coordinated Spatial Reuse for Wi-Fi 8: Group Creation and Scheduling. *arXiv preprint arXiv:2305.04846*, 2023.
23. T. Joshi, A. Mukherjee, Y. Yoo, and D.P. Agrawal. Airtime fairness for IEEE 802.11 multirate networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, pp. 513-527.
24. "Network simulator 3 (ns-3)." <https://www.nsnam.org>. Дата обращения: 29-11-2023.
25. R.K. Jain, et al. A quantitative measure of fairness and discrimination. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, pp. 513-527.

Multi-Link Scheduler for Real-Time Applications Service in Wi-Fi 8 Networks with Spatial Reuse

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

One of the use cases of Wi-Fi 8 is the service of Real-Time Applications (RTA), so the academic community is looking for methods that guarantee low delays for RTA traffic. Multi-AP coordination, the feature of future Wi-Fi 8, is potentially fruitful for tuning the mechanisms introduced earlier for RTA service. Spatial reuse introduced in Wi-Fi 6 allows a device to transmit its frame with reduced power simultaneously with some trigger-based transmission in an overlapping network. In addition, if an RTA device supports multi-link operation introduced in Wi-Fi 7, it can reduce delays by accessing the first available link. However, it often happens that RTA data appears when the ongoing transmissions in all available links disallow spatial reuse or require too strict power reduction. Multi-AP can solve the problem by tuning transmission schedules at different APs, taking into account RTA requirements. This paper proposes a multi-link scheduler that halves delays for devices with RTA traffic and does not degrade the quality of service for other traffic. The developed scheduler is based on the solution of a multi-objective optimization problem that minimizes the worst-case delays by providing the spatial reuse opportunity. To solve the problem, the scheduler uses a fast greedy algorithm. Extensive simulation shows that it is almost no worse than brute force.

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