

Исследование многоканальных методов доступа Wi-Fi 7 с использованием NS-3 *

В.Д. Парошин, А.В. Кротов

paroshin@wireless.iitp.ru, krotov@wireless.iitp.ru

Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук

Аннотация Разрабатываемый в настоящее время стандарт IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) позволяет устройствам использовать несколько независимых частотных каналов для передачи данных. Ожидается, что одновременное использование нескольких частотных каналов позволиткратно повысить пропускную способность в сетях нового поколения. Однако производительность сетей существенно зависит от особенностей реализации предложенных в стандарте механизмов. Данная работа имеет целью показать возможные проблемы, возникающие при реализации многоканальных методов доступа Wi-Fi 7 и предложить пути их решения. Для этого в среде имитационного моделирования NS-3 строится подробная имитационная модель многоканального устройства и исследуется производительность сети при использовании двух частотных каналов.

1 Введение

Требования к пропускной способности беспроводных сетей непрерывно растут. Новые приложения, такие как виртуальная и дополненная реальность, требуют высокой пропускной способности.

В существующих сетях Wi-Fi беспроводные устройства используют для передачи данных частотные каналы из одного из поддерживаемых диапазонов: 2,4 ГГц, 5 ГГц или 6 ГГц. Несмотря на то, что многие точки доступа поддерживают работу в нескольких диапазонах, устройства выбирают только один из них на этапе присоединения к сети, и в дальнейшем используют только его.

Стандарт IEEE 802.11be предлагает новый механизм *многоканального доступа* (англ.: Multi-Link Operation, MLO) [1]. Этот механизм позволяет беспроводным устройствам использовать для передачи несколько частотных каналов одновременно, что должно кратно повысить скорость передачи. Устройства, поддерживающие MLO, называются *многоканальными устройствами* (англ.: Multi-Link Device, MLD). Они могут работать в двух режимах: асинхронном и синхронном. В асинхронном режиме физические каналы никак не связаны между собой. Таким образом, устройство может одновременно вести прием

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

на одном канале и передачу на другом канале, поэтому асинхронный режим также называется режимом с *одновременной передачей и приемом* (англ.: Simultaneous Transmission and Reception, STR). Ожидается, что не все MLD будут поддерживать асинхронный режим из-за возможных помех, наводимых передающим каналом на остальные физические интерфейсы. Прежде всего это касается мобильных устройств, таких как мобильные телефоны, в которых различные интерфейсы расположены близко друг другу. Устройства, не поддерживающие асинхронный режим, также называются non-STR или NSTR-устройствами.

В работе [2] эффект интерференции между физическими интерфейсами одного устройства исследован экспериментально с использованием универсального программно-определяемого радиоустройства. Исследована зависимость вероятности успешного приема кадров в зависимости от расстояния между используемыми частотными каналами, ширины каналов и используемой сигнально-кодовой конструкции.

При работе в режиме non-STR возможно возникновение *STR-коллизий* [3], заключающихся в том, что станция может начать передачу на одном канале в то же время, когда на другом канале точка доступа будет вести передачу этой станции. В этом случае станция не сможет принять кадр из-за интерференции, создаваемой ее собственной передачей. Для уменьшения влияния этой проблемы стандарт 802.11be предлагает точкам доступа выравнивать передачи, получателем которых являются non-STR станции, таким образом, чтобы окончание передачи совпадало на обоих каналах. Таким образом оба канала оказываются заняты приемом данных одновременно и уменьшается вероятность того, что станция начнет передачу на одном из них. Авторы [3] рассмотрели проблему STR-коллизий и показали, что простейшее возможное решение, заключающееся в приостановке попыток доступа к среде, когда один из каналов, используемых non-STR STA, оказывается занят, приводит к низкой производительности. Они предложили модификацию протокола в виде правил, позволяющих устройствам в некоторых случаях возобновлять попытки доступа к среде, если возможно определить, что последующая передача не приведет к коллизии.

В статье [4] исследуются возможные правила отсчета счетчика отсрочки при использовании MLO. Построена аналитическая модель сети, использующей одно из пяти возможных правил: асинхронная передача; передача с использованием только одного канала, для которого отсчитан счетчик отсрочки и заморозка счетчика отсрочки на другом канале (англ.: single-link access, SLA); одновременная передача с использованием нескольких каналов после отсчета счетчика отсрочки на любом из них (англ.: multi-link access with the shortest backoff, MLA-S); одновременная передача с использованием нескольких каналов после отсчета счетчика отсрочки на всех каналах (англ.: multi-link access with the longest backoff, MLA-L); асинхронная передача с использованием нескольких каналов при условии выравнивания концов передач (англ.: multi-link access with end-time alignment, MLA-A). Построена аналитическая модель, позволяющая найти пропускную способность сети.

В [5] исследуется проблема назначения потокам данных физических каналов при использовании MLO. Авторы рассматривают сценарии с несколькими точками доступа, к каждой из которых подключено случайное число станций. В сети периодически возникают потоки данных от точек доступа к станциям средней длительностью 1 секунда со средней длительностью интервала между потоками 3 секунды. С помощью имитационного моделирования проведено сравнение различных политик назначения потокам доступных физических каналов: назначение одного наименее загруженного канала, равномерное распределение данных по всем доступным интерфейсам и распределение пропорционально долям времени, в течение которого каналы были свободны. В результате сравнения было показано, что использование наименее загруженного канала и пропорциональное распределение позволяют обслуживать значительно большее число потоков, чем при использовании политики равномерного распределения, не учитывающей загруженность каналов. Для имитационного моделирования авторы разработали имитационную модель на языке C++.

Большинство существующих работ, посвященных исследованию MLO в сетях Wi-Fi, рассматривают режим non-STR и задачи, связанные с использованием данного режима. В то же время работы, в которых исследуется режим STR, подробно исследуют только работу физического уровня, и не рассматривают детально работу уровня доступа к каналу (англ.: Medium Access Control, MAC) при использовании MLO.

Целью данного исследования является разработка детальной модели работы устройств MLD на основе платформы имитационного моделирования NS-3, исследование производительности сетей Wi-Fi при использовании MLO и выявление возможных проблем при его реализации, связанных с взаимодействием между различными уровнями сетевых протоколов.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 подробно описана технология MLO и особенности ее реализации в стандарте IEEE 802.11be. В разделе 3 описана архитектура модели, построенной с использованием платформы имитационного моделирования NS-3. В разделе 4 приведено описание эксперимента и численные результаты. Раздел 5 содержит выводы и заключение.

2 Объект исследования

2.1 Доступ к каналу в сетях Wi-Fi

Сети Wi-Fi используют базовый метод доступа к среде EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access, улучшенный распределенный доступ к каналу), основанный на методе множественного доступа с контролем несущей и избеганием коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance, CSMA/CA). Перед отправкой кадра станция взводит счетчик отсрочки, выбранный случайно в интервале $[0, CW)$, где параметр CW ограничивает максимально возможное значение счетчика отсрочки и называется конкурентным окном. Изначально конкурентное окно равно CW_{min} и увеличивается в 2 раза при каждой

неудачной попытке передачи. При удачной попытке передачи значение параметра CW снова устанавливается равным CW_{min} . Значение счетчика отсрочки уменьшается на единицу после каждого интервала σ , в течение которого канал свободен. Если канал становится занятым, то значение счетчика отсрочки замораживается и возобновляется после того, как канал пробудет свободным в течение межкадрового интервала AIFS (англ. Arbitration Inter-Frame Space). Когда значение счетчика отсрочки достигает нуля, станция начинает передачу.

Помимо прослушивания канала для определения занятости среды станции используют механизм виртуальной занятости среды NAV (англ. Network Allocation Vector). Данный механизм работает следующим образом. Кадры содержат поле Duration/ID, в котором сообщается, в течение какого времени после окончания приема сигнала среда должна считаться занятой. При удачном приеме станции переносят его значение в таймер NAV, отсчитывающий время виртуальной занятости среды. Все время, пока значение таймера NAV ненулевое, среда считается занятой, а значение таймера непрерывно уменьшается до тех пор, пока не станет равным нулю.

2.2 Блочное подтверждение

Современные сети Wi-Fi используют механизм блочного подтверждения, позволяющий устройствам отправлять множество кадров (англ.: MAC Protocol Data Unit, MPDU), не дожидаясь подтверждения получения каждого из них по отдельности.

Рассмотрим работу механизма блочного подтверждения. Перед тем как начать использование данного механизма, станция-получатель и станция-отправитель обмениваются служебными кадрами, в которых передается размер окна, т.е. количество кадров N , которые могут быть одновременно переданы без получения подтверждения. Таким образом устанавливается *соглашение Block Ack* (англ.: Block Ack Agreement) между устройствами.

Пусть станция А отправляет станции Б группу из N кадров. Станция Б, получив группу кадров, отметит успешно доставленные в массиве из нулей и единиц, называемом scoreboard. Номера его граничных элементов называются $[WinStart_R$ и $WinEnd_R]$. Далее станция Б передаст станции А *блочное подтверждение* (англ.: Block Ack) вместе с массивом scoreboard, тем самым уведомив её, какие кадры были успешно приняты. В случае, если станция А не получит подтверждение, она может отправить *запрос на блочное подтверждение* (англ.: Block Ack Request, BAR).

Станция-отправитель поддерживает окно $[WinStart_O, WinEnd_O]$ размером N кадров, оно занимается отслеживанием первого и последнего кадров в очереди, которые могут быть отправлены. После получения подтверждения станция А продвинет начало окна $WinStart_O$ вперед таким образом, чтобы в начале окна находился первый неподтвержденный кадр. После этого все неподтвержденные кадры, находящиеся внутри окна $[WinStart_O, WinEnd_O]$ могут быть переданы, возможно, повторно.

Для того, чтобы порядок кадров сохранялся при передаче по Wi-Fi-соединению, получатель сохраняет кадры в окне получателя (англ.: reordering

window) $[WinStart_B, WinEnd_B]$. Начало окна $WinStart_B$ соответствует первому кадру, получение которого все еще ожидается на приемнике. При получении очередного кадра окно получателя сохраняет его, но не передает протоколу, находящемуся уровнем выше, до тех пор, пока не будут приняты все предыдущие кадры. Это гарантирует, что кадры будут доставлены в том порядке, в котором были отправлены.

Как правило правая граница окна scoreboard $WinEnd_R$ соответствует последнему принятому кадру, а левая граница reordering window $WinStart_B$ соответствует первому не принятому кадру. Однако в случае получения запроса BAR получатель сдвигает *начало окна* $WinStart_R$ и начало окна $WinStart_B$ таким образом, чтобы они соответствовали первому кадру, для которого запрошено подтверждение. Это необходимо для того, чтобы получатель больше не запрашивал и не ожидал кадры, которые точно не будут переданы.

Поскольку размер окна передатчика ограничен (так же как и размер окна приемника и размер scoreboard), то возможна ситуация, когда большая часть кадров в окне передатчика подтверждена, но в начале окна есть неподтвержденный кадр. В этом случае возникает проблема блокирования окна (англ.: window stall problem).

При использовании механизма блочного подтверждения кадры могут быть объединены в последовательности, называемые A-MPDU (англ.: Aggregated MPDU). Это позволяет снизить накладные расходы, поскольку кадры внутри A-MPDU не требуется разделять межкадровыми интервалами и для передачи A-MPDU достаточно отсчитать счетчик отсрочки только один раз.

2.3 Многоканальный доступ

Как было сказано выше, MLD имеет несколько физических интерфейсов, ведущих параллельно передачу на разных частотных каналах. При этом MLD-устройства используют общие очереди EDCA и общее окно Block Ack для всех физических интерфейсов.

Отдельно скажем, что на уровне доступа к среде в многоканальных устройствах лежит задача распределения пакетов из приоритизированных очередей по физическим каналам, а также задача синхронизации каналов между собой, поэтому целый ряд проблем, возникающих с MLO, например, проблема блокировки окна, должен решаться именно на этом уровне.

3 Описание модели

На рис. 1 изображена архитектура модели MLD-устройства, реализованная на основе версии 3.35 платформы имитационного моделирования NS-3. Начнем с описания того, какой путь проходит трафик по модели. Данные отправляются на сетевой интерфейс Wi-Fi (англ.: Wi-Fi Device), затем передаются на MAC-уровень, где они распределяются по EDCA-очередям. Каждая EDCA-очередь хранит по одному счетчику отсрочки для каждого физического

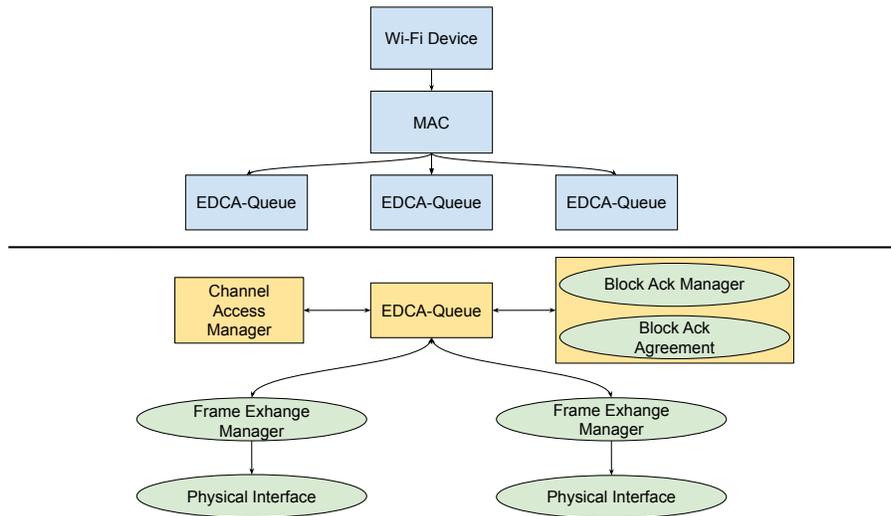


Рис. 1: Архитектура имитационной модели в среде NS-3

канала. У физических каналов есть отдельные менеджеры доступа к среде (англ.: Channel Access Manager), отслеживающие занятость среды.

Порядок передачи кадров определяется менеджерами обмена кадрами (англ.: Frame Exchange Manager). Каждый физический интерфейс использует отдельный менеджер обмена кадрами. В модели реализован STR-режим, поэтому при получении доступа к среде на любом из интерфейсов соответствующий менеджер обмена кадрами извлекает кадры из общих очередей и передает их на физический интерфейс. Физический интерфейс формирует сигнал и передает его в канал (англ.: Channel) — модель беспроводной среды.

В отличие от NS-3.34, управление Block Ack соглашениями выполняется не в менеджере обмена кадрами, а в менеджере блочного подтверждения (англ.: Block Ack Manager). Таким образом, соглашение достаточно установить один раз на любом канале, после чего общее соглашение и общие окна Block Ack используются всеми физическими интерфейсами.

4 Численные результаты

Рассматривается сценарий, в котором к одной точке доступа, поддерживающей MLO, присоединена одна станция. Точка доступа и станция используют два непересекающихся канала шириной 80 МГц в диапазоне 5 ГГц. Окно Block Ack имеет размер 256. Передается насыщенный поток данных от точки доступа к станции. Подробно параметры эксперимента приведены в таблице 1.

В первом эксперименте варьировалось расстояние между станцией и точкой доступа. На рис. 2 изображена зависимость пропускной способности от расстояния между станцией и точкой доступа при использовании одного

Таблица 1: Параметры эксперимента

Параметр	Значение
Модель канала	MultiModelSpectrumChannel
Модель распространения сигнала	LogDistancePropagationLossModel
Модель задержек распространения	ConstantSpeedPropagationDelayModel
Ширина канала	80 МГц
Стандарт	802.11ax 5 ГГц
Алгоритм выбора СКК	ThompsonSamplingWifiManager [6]
Размер окна Block Ack	256
Механизм RTS/CTS	выключен
MIMO	2x2

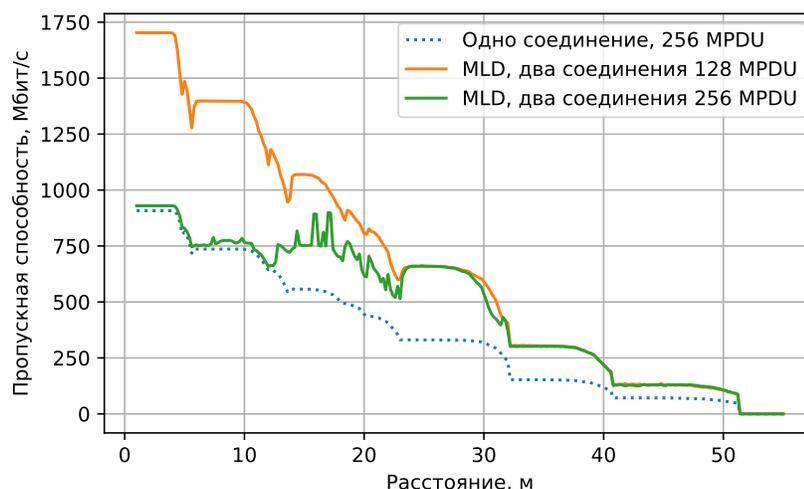


Рис. 2: Зависимость пропускной способности от расстояния

физического канала и при использовании двух физических каналов. При использовании двух физических каналов рассматривались различные ограничения максимального количества кадров (MPDU) в составе одной блочной передачи: 256 и 128 MPDU.

При малом расстоянии между станцией и точкой доступа пропускная способность при использовании двух каналов и передаче до 256 кадров внутри одной передачи близка к пропускной способности, получаемой при использовании одного канала. Это связано с тем, что максимальное количество передаваемых кадров совпадает с размером окна Block Ack на точке доступа, и сразу после передачи на одном из каналов все кадры внутри окна ожидают подтверждения. Даже если до получения подтверждения точка доступа получает

доступ к среде на втором канале, она не может передать ни один кадр данных, поэтому всегда используется только один канал. Возникает проблема блокирования окна, описанная в разделе 2.2. Незначительное увеличение пропускной способности по сравнению с использованием одного канала в этом случае объясняется более быстрым получением доступа к среде за счет того, что два счетчика отсрочки отсчитываются одновременно. В то же время при использовании более низкого ограничения количества MPDU внутри A-MPDU пропускная способность оказывается существенно выше.

При увеличении расстояния между станцией и точкой доступа алгоритм выбора СКК снижает скорость передачи и длительность передачи каждого кадра возрастает. Поскольку помимо заданного ограничения на количество MPDU внутри одной передачи действует ограничение стандарта на длительность передачи, равное 5,484 мс, с увеличением расстояния снижается количество MPDU внутри одной передачи. Из-за этого при расстоянии больше 14 метров проблема блокирования окна исчезает, и даже при ограничении на количество кадров, равном 256 MPDU, пропускная способность при использовании двух каналов становится больше, чем пропускная способность при использовании одного канала. При дальнейшем увеличении расстояния количество MPDU внутри A-MPDU полностью определяется ограничением длительности передачи, и пропускная способность при установленном ограничении 256 MPDU и 128 MPDU совпадает и становится равной удвоенной пропускной способности одного соединения.

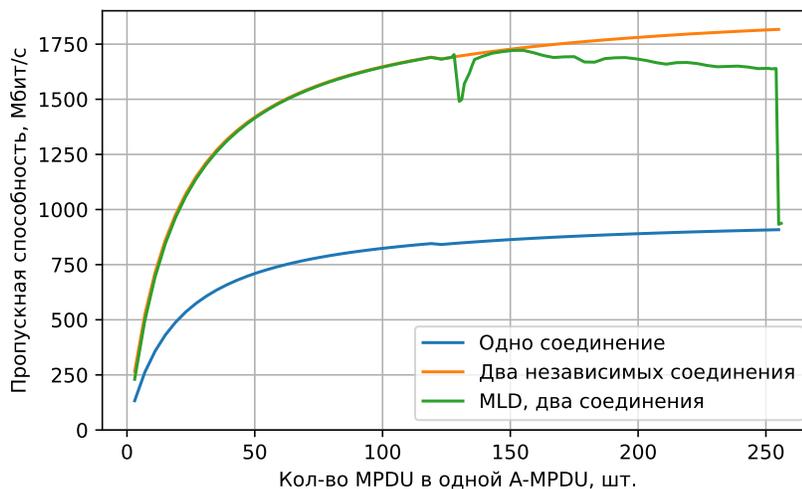


Рис. 3: Зависимость пропускной способности от количества кадров в блочной передаче

Рассмотрим более детально зависимость пропускной способности от ограничения на количество кадров, передаваемых одновременно с использованием блочной передачи, изображенную на рис. 3. В данном эксперименте точка доступа и станция расположены на расстоянии 1 м, чтобы исключить влияние ограничения на длительность передачи. Для сравнения также приведена удвоенная пропускная способность соединения, использующего один канал. При увеличении количества кадров внутри A-MPDU от 1 до 128 пропускная способность возрастает за счет снижения доли накладных расходов (отсчет счетчика отсрочки, межкадровые интервалы и т.д.). При этом пропускная способность MLD-устройства совпадает с пропускной способностью двух независимых соединений, то есть проблема блокирования окна отсутствует.

При дальнейшем увеличении ограничения от 130 до 255 кадров пропускная способность должна снижаться, если наложить условие, что на кадры из A-MPDU можно отправлять подтверждение только *по окончании приема данной A-MPDU*. Ведь при этом ограничении после передачи на первом канале первой A-MPDU размером $128+x$ кадров на втором канале возможна передача только A-MPDU размером $128-x$ кадров из-за блокирования окна. А поскольку накладные расходы на передачу фиксированы, выигрыш в пропускной способности от увеличения размера A-MPDU на x кадров всегда меньше, чем проигрыш от уменьшения размера A-MPDU на x кадров, поэтому при $x = 0$ достигалась бы максимальная пропускная способность.

Тем не менее, наложенное условие не имеет места, и пропускная способность при ограничении размера A-MPDU, большем 130, поначалу не снижается, а возрастает. Дело в том, что по окончании приема A-MPDU на первом канале отправляется блочное подтверждение, в которое включается часть кадров уже принятых на втором канале. Поэтому следующая A-MPDU, отправляемая на первом канале, будет больше чем $256-y$, где y — текущий размер передаваемой A-MPDU на втором канале. Таким образом, средний размер создаваемых A-MPDU оказывается больше 128 кадров.

Отдельно рассмотрим случай, когда используется ограничение на размер A-MPDU, равное 129 кадрам. В этом случае все A-MPDU состоят из 129 или 127 кадров и имеют приблизительно одинаковую длительность передачи. Поскольку получение подтверждения на любом из каналов приводит к разблокированию окна и началу передачи на другом канале, то начала и окончания передач на разных каналах также оказываются близки по времени. В этом сценарии вероятен случай, когда при окончании приема A-MPDU на одном из каналов формируется подтверждение, включающие все уже принятые кадры, за исключением одного последнего кадра, передача которого все еще ведется на соседнем канале. Если кадр подтверждения оказывается принят на точке доступа после того, как она завершила передачу A-MPDU, отсутствие подтверждения последнего кадра интерпретируется как сигнал о неудачной попытке передачи, что приводит к повторной отправке кадра. Частые повторные попытки передачи единичных успешно доставленных кадров в этом случае приводят к тому, что пропускная способность при ограничении, равном 129 кадров, оказывается

заметно ниже пропускной способности при использовании ограничений, равных 128 и 130 кадров.

Остановимся на резком спаде пропускной способности перед размером A-MPDU, равным 256. Этот спад обусловлен тем, что при переходе от 255 к 256 кадрам в одной A-MPDU качественно меняется ситуация — при размере 256 один из каналов простаивает, он не может отправить ни один кадр, следовательно, не будет сгенерировано подтверждения, включающего какую-либо часть уже переданных кадров с другого канала. Итак, получен случай эквивалентный случаю единственного канала, что подтверждается экспериментами на рис. 3 и рис. 2

5 Заключение

В данной работе была разработана подробная модель работы сети Wi-Fi с использованием многоканального доступа в асинхронном режиме. С помощью имитационного моделирования была выявлена проблема блокирования окна Block Ack при использовании многоканального доступа, приводящая к тому, что при отсутствии ограничений на длительность передачи внутри одного канала пропускная способность соединения совпадает с пропускной способностью одного канала.

Было показано, что с использованием ограничения на размер блочной передачи возможно повысить производительность сети при использовании многоканального доступа.

В последующих исследованиях планируется разработать алгоритмы, позволяющие динамически выбирать количество кадров, передаваемых внутри блочной передачи таким образом, чтобы повысить и максимизировать производительность сетей Wi-Fi 7 при использовании многоканального доступа.

Список литературы

1. Evgeny Khorov, Ilya Levitsky, and Ian F Akyildiz. Current status and directions of IEEE 802.11be, the future Wi-Fi 7. *IEEE Access*, 8:88664–88688, 2020.
2. Ilya Levitsky, Yaroslav Okatev, and Evgeny Khorov. Study on simultaneous transmission and reception on multiple links in IEEE 802.11be networks. In *2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*, pages 1–4. IEEE, 2020.
3. Sharan Naribole, Wook Bong Lee, Srinivas Kandala, and Ashok Ranganath. Simultaneous transmit-recvie multi-channel operation in next generation wlans. In *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–8. IEEE, 2020.
4. Taewon Song and Taeyoon Kim. Performance analysis of synchronous multi-radio multi-link MAC protocols in IEEE 802.11be extremely high throughput wlans. *Applied Sciences*, 11(1):317, 2021.
5. Álvaro López-Raventós and Boris Bellalta. IEEE 802.11be multi-link operation: When the best could be to use only a single interface. *arXiv preprint arXiv:2105.10199*, 2021.

6. Alexander Krotov, Anton Kiryanov, and Evgeny Khorov. Rate control with spatial reuse for Wi-Fi 6 dense deployments. *IEEE Access*, 8:168898–168909, 2020.