

Исследование адаптивного алгоритма управления ожиданием при доступе к среде в сетях IEEE 802.11be

Д.В. Банков*, Е.С. Богданов*^{**,*}, И.А. Левицкий*, В.А. Логинов*, Е.М. Хоров*

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

**Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Поступила в редколлегию 01.12.23. Принята 21.12.23.

Аннотация—Для увеличения пропускной способности сетей Wi-Fi в дополнении к стандарту IEEE 802.11be введена поддержка многоканальных передач, позволяющая устройствам передавать и принимать данные в нескольких каналах. В работе исследован адаптивный алгоритм управления ожиданием при доступе к среде для многоканальных устройств, которые не могут осуществлять одновременные прием и передачу в разных каналах. Особенностью алгоритма является учет пропускных способностей каналов, числа одноканальных устройств в сети и интенсивности их трафика в каналах. С помощью имитационного моделирования показана высокая эффективность разработанного алгоритма.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Wi-Fi 7, IEEE 802.11be, многоканальные передачи, NSTR.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_4_642

1. ВВЕДЕНИЕ

Для повышения пропускной способности в стандарте IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) [1], вводится технология многоканальных передач (англ.: multi-link operation, MLO). Уникальным преимуществом MLO является возможность гибкого управления частотными ресурсами. В отличие от объединения нескольких узких каналов в один широкий канал, MLO разрешает получать независимый доступ к среде в каждом канале [2], что приводит к снижению задержек передач и повышению их надежности [3].

Существует два класса многоканальных устройств (англ.: multi-link device, MLD): одни способны одновременно передавать и принимать данные в разных каналах (англ.: simultaneous transmit-recvie, STR), а другие — нет (англ.: non-simultaneous transmit-recvie, NSTR). Предполагается [1, 4], что из-за сильной межканальной интерференции многие мобильные устройства будут являться NSTR MLD.

Пропускная способность MLD преимущественно зависит от метода доступа к среде. Для обычных станций в современных сетях Wi-Fi используется базовый метод случайного доступа к среде Enhanced Distributed Channel Access (EDCA), который, упрощенно, работает следующим образом. После окончания передачи предыдущего кадра станция ожидает случайное время с помощью процедуры отсрочки. Для этого она инициализирует счетчик отсрочки случайным целым числом, выбранным равномерно на отрезке от 0 до размера конкурентного окна CW . Отсчет отсрочки уменьшается на единицу каждый слот σ , пока канал свободен. Счетчик отсрочки замораживается, если канал становится занятым сторонней передачей, и возобновляется, когда канал стал свободным на определенное время. Когда значение счетчика отсрочки становится равным нулю, станция получает доступ к среде и начинает попытку передачи. Если попытка передачи успешная, то есть получено подтверждение, то станция устанавливает размер конкурентного окна CW равным CW_{min} , а иначе удваивает текущий размер конкурентного окна и повторяет попытку передачи через новое случайное время.

В стандарте IEEE 802.11be [1] для NSTR MLD описан метод доступа к среде, который использует независимые процедуры отсрочки в каждом канале согласно базовому методу EDCA. При этом во время передачи MLD в одном канале соревнование за другие каналы невозможно из-за ограничения NSTR, поэтому счетчики отсрочки в этих каналах замораживаются до окончания передачи. В момент окончания отсрочки в любом из каналов, стандартный метод допускает совершение одного из трех действий:

1. отказ от передачи — устройство теряет доступ к среде и начинает новую процедуру отсрочки без увеличения конкурентного окна,
2. мгновенная передача — устройство осуществляет *одиночную* передачу в одном канале или, если оба счетчика отсрочки истекли одновременно, *совместную* передачу в нескольких каналах,
3. ожидание — устройство ожидает истечения счетчиков отсрочки в других каналах; при этом:
 - если во время ожидания хотя бы в одном канале началась сторонняя передача, то истекший счетчик отсрочки взводится заново без изменения конкурентного окна;
 - иначе, когда счетчик отсрочки истекает на втором канале, осуществляется совместная передача.

Для принятия решения о выборе одного из трех указанных действий в соответствии с некоторой целью, например максимизацией пропускной способности, требуется *алгоритм управления ожиданием*, который стандартом не регламентирован.

В литературе до сих пор центром внимания было изучение различных методов доступа к среде для NSTR MLD, но не алгоритмов управления ожиданием для стандартного метода доступа. Принятие решения об ожидании нетривиально и сопряжено с риском потерять доступ к первому каналу в случае начала сторонней передачи. Например, для повышения пропускной способности MLD неэффективно ждать сильно загруженный канал, используемый несколькими устройствами, если уже получен доступ в канале большей емкости. И, напротив, ожидание выгодно в случае равных условий в каналах. Возникает задача поиска лучшего алгоритма управления ожиданием.

В работе описан и исследован адаптивный алгоритм управления ожиданием при доступе к среде, который обеспечивает наилучшую пропускную способность NSTR MLD почти в каждом отдельном сценарии. Алгоритм учитывает текущие емкости каналов, пропускную способность и частоту проведения совместных передач NSTR MLD, интенсивность трафика в каждом из каналов и число одноканальных устройств (англ.: single-link device, SLD) в них.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. Обзор литературы представлен в разделе 2. В разделе 3 изложены базовые алгоритмы управления ожиданием, а в разделе 4 описан адаптивный алгоритм. Анализ численных результатов имитационного моделирования приведен в разделе 5. Раздел 6 содержит заключение.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время активно исследуется MLO, в особенности различные методы доступа к среде для NSTR MLD. В работе [4] описаны возможные трудности при использовании методов доступа в MLO, а также предложен механизм для помощи NSTR MLD со стороны точки доступа осуществить многоканальную передачу. Авторы демонстрируют, что пропускная способность NSTR MLD выше, чем SLD, а предложенный механизм позволяет увеличить ее дополнительно. В работе [5] описываются пять методов доступа к среде. Среди них есть стандартный метод, метод доступа без ожидания, метод доступа по наискорейшему истекшему счетчику отсрочки, и другие. В работе сравниваются эти методы с точки зрения пропускной способности и справедливости распределения ресурсов. Показано, что в первом приближении

значения эффективностей этих методов близки и заметно снижаются в сетях со сторонним насыщенным трафиком. Это происходит из-за малых шансов осуществить одновременную передачу в нескольких каналах. Авторы работы [6] предлагают механизм, позволяющий NSTR MLD осуществлять передачу при приеме стороннего кадра в другом канале, если он не предназначен этому MLD. Показано, что новый механизм дает небольшое преимущество MLD как по пропускной способности, так и по задержке передачи.

Однако, более актуальной задачей является управление методом доступа для NSTR MLD, уже специфицированным в стандарте IEEE 802.11be. Метод задает порядок получения доступа к среде в каналах и возможные действия в момент получения доступа к среде. Для выбора наилучшего действия требуется специальный алгоритм, от которого во многом зависит производительность NSTR MLD. Такой алгоритм стандартом не регламентируется, и в литературе такие алгоритмы явно не предложены и не исследованы. Тем не менее, следуя идеям из литературы, можно выделить несколько алгоритмов управления ожиданием для стандартного метода доступа к среде. Кратко опишем их, указав источники для идей этих алгоритмов: (i) устройство осуществляет передачи в одном выбранном канале и работает как SLD [4, 6]; (ii) устройство использует один основной канал и вспомогательные для осуществления совместных передач [7]; (iii) устройство осуществляет передачу сразу после получения доступа к любому каналу [6, 8]; (iv) устройство всегда ожидает окончания процедуры отсрочки в свободном канале, а на занятом — не ожидает [4, 8].

Более того, для большей актуальности, следует исследовать эффективность алгоритмов в условиях стороннего трафика, приближенных к реальным. Зачастую в работах, направленных на изучение пропускной способности MLD, например [5, 6], используют насыщенный сторонний трафик. Однако для большинства реальных приложений трафик разреженный, поэтому результаты этих работ не позволяют оценить производительность MLD устройств в реалистичных сценариях. Тем не менее, существуют работы, которые рассматривают ненасыщенный сторонний трафик, чаще всего пуассоновский. В работе [3] сравниваются SLD, STR MLD и NSTR MLD в условиях пуассоновского стороннего трафика с точки зрения минимальной задержки при сохранении 95% надежности передачи. Показано, что в случае симметричной нагрузки сети MLO способствует значительному снижению задержки передачи, при этом влияние методов доступа на пропускную способность не было рассмотрено. Авторы работы [9] рассмотрели несколько методов доступа к среде для NSTR MLD, в том числе стандартный метод из IEEE 802.11be, в условиях пуассоновского трафика SLD. В результате показано, что NSTR MLD получают большую пропускную способность, чем SLD в условиях ненасыщенного стороннего трафика. Однако рассмотрены только сценарии с равным распределением SLD по каналам. В общем, симметричность каналов по емкости и сторонней нагрузке — это еще одно упрощение, например встречающееся в работах [3, 4, 6, 9], которое сильно ограничивает спектр сценариев. Авторы работы [8] исследуют сценарии с различными распределениями SLD, генерирующих насыщенный трафик, и замечают, что наибольший прирост пропускной способности NSTR MLD в сравнении с SLD достигается в симметричных сценариях.

Стоит отметить, что проблема выбора многоканального метода доступа решается также для сетей 5G [10–12], при этом рассматриваются методы доступа к среде в нелицензируемых каналах. Однако в работах, посвященных 5G, исследуются принципиально другие методы, например, доступ к среде в нелицензируемом канале осуществляется по различным правилам для основного и вспомогательных каналов [12]. Более того, в этих работах преимущественно описывается проблема эффективного и справедливого сосуществования с устройствами Wi-Fi в общих частотных областях [10, 11], для чего разрабатывают и сравнивают различные методы доступа к среде. Также задача о выборе наилучшего метода доступа для многоканальных передач решается для технологии V2X [13] с целью увеличить число пользователей, удовлетво-

ренных качеством обслуживания. В данном случае один из объединяемых каналов является основным, в котором необходимо получить доступ к среде для осуществления какой-либо передачи. Это отличает сети V2X от сетей Wi-Fi 7, где возможно независимое использование каждого канала.

В итоге, исследования в области MLO, как для локальных, так и для сотовых сетей, сфокусированы на различных методах доступа к каналу, но не на алгоритмах управления ими, в особенности стандартным методом из IEEE 802.11be. Кроме того, условия для исследования методов зачастую ограничены: используется насыщенный сторонний трафик, рассматриваются только симметричные сценарии, или изучается другая метрика отличная от пропускной способности.

Данная работа является расширением конференционной работы [7]. В работе приведено несколько алгоритмов управления ожиданием, кратко описанные выше, которые сравниваются с точки зрения пропускной способности NSTR MLD. Устройства работают в условиях группового пуассоновского трафика, при котором на станцию SLD поступает не один, а группа пакетов. Такой трафик более правдоподобный: например, он точнее описывает загрузку веб-страниц и данных приложений социальных сетей. Совместно с произвольным распределением SLD по каналам, он позволяет более полно изучить влияние сторонних передач на пропускную способность NSTR MLD в сетях 802.11be.

3. ОБЗОР БАЗОВЫХ АЛГОРИТМОВ NSTR MLD

Согласно стандарту IEEE 802.11be, алгоритм может совершить одно из трех действий, описанных в разделе 1: отказ от передачи, мгновенная передача, или ожидание. С использованием алгоритма **NoWaiting** [6, 8] NSTR MLD осуществляет только мгновенные передачи. Примечательно, что, даже при низкой интенсивности трафика SLD в сети, с алгоритмом **NoWaiting** мгновенные передачи редко бывают совместными, так как для этого требуется, чтобы процедуры отсрочки в обоих каналах закончились одновременно, но это событие маловероятно в присутствии передач SLD.

В отличие от **NoWaiting**, алгоритм **Waiting** [4, 8] увеличивает долю совместных передач. Возможны два действия:

- если счетчики отсрочки истекли в нескольких каналах или только в одном канале, а второй занят сторонней передачей, то NSTR MLD осуществляет мгновенную передачу;
- если счетчик отсрочки истек в одном канале, а второй канал свободен, то NSTR MLD ожидает окончания отсрочки во втором канале.

Ожидается, что алгоритм **Waiting** эффективен при низкой интенсивности трафика SLD, так как вероятность успешного ожидания второго канала в таком случае велика.

NoWaiting и **Waiting** являются *симметричными*, то есть эти алгоритмы работают одинаково в обоих каналах вне зависимости от условий на них. Однако, если, например, емкости каналов сильно различаются, то стоит чаще использовать для передачи тот канал, где пропускная способность ожидается больше. Поэтому применяется *несимметричный* алгоритм **SingleLink** [4, 6]. При его использовании, если истекла отсрочка только в основном канале и, возможно, во вспомогательных, то NSTR MLD осуществляет мгновенную передачу в этих каналах. Если истекла отсрочка только во вспомогательном канале, то NSTR MLD отказывается от передачи. Таким образом, NSTR MLD работает преимущественно как SLD и практически не совершает совместные передачи, то есть не использует преимущества MLO. Для исправления этого недостатка предложена модификация **SingleLink+** [7], где отказ от передачи во вспомогательном канале заменен на ожидание. Несимметричный алгоритм **SingleLink+** может

быть эффективен в случае насыщенного трафика SLD. Например, когда SLD генерируют насыщенный трафик и распределены симметрично, а емкости каналов сильно отличаются. Тогда с точки зрения пропускной способности выгоднее соревноваться за один быстрый канал.

4. ОПИСАНИЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА

Базовые алгоритмы, описанные в разделе 3, являются эффективными только в ограниченном наборе сценариев, в частности, поскольку в реальных сценариях условия в каналах с течением времени могут меняться. В работе предложен алгоритм **Adaptive**, который способен выбирать лучший режим работы в двух каналах, опираясь не только на мгновенное состояние каналов и/или значения счетчиков процедур отсрочки NSTR MLD, но и емкости каналов и актуальную степень их загруженности.

Как показывают численные результаты в разделе 5, наибольшую пропускную способность NSTR MLD среди базовых алгоритмов демонстрируют Waiting или SingleLink+. При этом алгоритм Waiting показывает лучший результат преимущественно в области малой интенсивности трафика SLD, а SingleLink+, напротив, в случае насыщенного трафика SLD, особенно когда скорости каналов значительно отличаются. Алгоритм Adaptive осуществляет переключения между двумя базовыми алгоритмами Waiting и SingleLink+. Чтобы избежать двусмысленности, состояния, когда Adaptive принимает решение согласно базовому алгоритму, будут называться *режимами* работы Waiting и SingleLink+ соответственно.

Решение о выборе одного из режимов принимается в момент завершения процедуры отсрочки NSTR MLD в любом канале, но не чаще, чем раз в T микросекунд. В момент принятия решения учитываются пропускная способность NSTR MLD S^{MLD} и частота совершения NSTR MLD совместных передач ν^{MLD} . Пусть также NSTR MLD знает число SLD на каждом канале, в том числе, сколько из них имеют не пустой буфер.

4.1. Переключение на SingleLink+

Переключение на режим SingleLink+ с основным каналом $k \in \{1, 2\}$ и числом активных станций SLD на нем N_k^{SLD} осуществляется при условии, что текущая скорость S^{MLD} меньше, чем скорость S_k^{SL+} в канале k в режиме SingleLink+, оцениваемая по формуле

$$S_k^{SL+} = \frac{C_k}{N_k^{SLD} + 1}. \quad (1)$$

Величина S^{MLD} обновляется в момент поступления подтверждения на отправленные кадры и рассчитывается методом экспоненциального сглаживания с параметром времени T по формуле

$$S^{MLD}(t + \Delta t) = S^{MLD}(t) \exp\left(-\frac{\Delta t}{T}\right) + \frac{V}{\Delta t} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T}\right)\right), \quad (2)$$

где V — объем успешно переданной информации, а Δt — время, прошедшее с последнего подтверждения. Для сокращения ошибочных переключений, связанных с краткосрочным увеличением трафика SLD устройств используется гистерезис: для переключения должно выполняться $S_k^{SL+} > S^{MLD}(1 + \alpha^{TH})$, где $S_k^{SL+} = \max\{S_1^{SL+}, S_2^{SL+}\}$. Также возможна смена основного канала k_1 на k_2 в режиме SingleLink+ при условии $S_{k_2}^{SL+} > S_{k_1}^{SL+}$.

Стоит отметить, что формула (1) получается из предположения, что все станции SLD и NSTR MLD при использовании алгоритма SingleLink+ делят канал поровну в условиях насыщенного трафика каждой станции в канале. В действительности она справедлива для алгоритма SingleLink, а SingleLink+ может давать сравнительно большую пропускную способность NSTR MLD, что показано в разделе 5.

4.2. Переключение на *Waiting*

В разделе 5 показано, что *Waiting* выгоднее *SingleLink+* в случае, когда часто возможны совместные передачи. Поэтому переключение осуществляется при условии того, что частота совместных передач ν^{MLD} больше граничного значения ν^{TH} . Величина ν^{MLD} обновляется в момент начала совместной передачи и рассчитывается методом экспоненциального сглаживания с параметром времени равным T по формуле

$$\nu^{MLD}(t + \Delta t) = \nu^{MLD}(t) \exp\left(-\frac{\Delta t}{T}\right) + \frac{1}{\Delta t} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T}\right)\right), \quad (3)$$

где Δt — время, прошедшее с последней совместной передачи.

Сделаем два замечания по поводу переключения режимов. Во-первых, отметим, что при одновременном выполнении условий для переключения на режим *SingleLink+* и на режим *Waiting* переключение осуществляется на режим *Waiting*. Во-вторых, при переключении на режим *Waiting* вводится дополнительное условие: если MLD работает в режиме *SingleLink+* на непустом канале, в котором есть устройства SLD, конкурирующие за доступ к каналу, а другой канал пустой, то переключение на режим *Waiting* не происходит. Описанный случай актуален, когда емкости каналов сильно отличаются, и достижимая пропускная способность в непустом канале больше в несколько раз. В описанном случае в режиме *SingleLink+* почти все передачи будут совместными, а в режиме *Waiting* будут преимущественно одиночные передачи в пустом канале с малой емкостью. В итоге режим *SingleLink+* дает большую пропускную способность, чем *Waiting*.

5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим сеть 802.11be, содержащую одну передающую станцию NSTR MLD и N_k^{SLD} станций SLD в канале k . NSTR MLD использует два канала, каждый канал k имеет некоторую постоянную емкость C_k . Под емкостью подразумевается пропускная способность SLD с насыщенным трафиком при отсутствии других устройств в канале с учетом протокольных издержек. В работе исследуется максимально возможная пропускная способность NSTR MLD с описанными алгоритмами при наличии стороннего трафика различной интенсивности. Поэтому для NSTR MLD выбран насыщенный трафик, а сторонний трафик от станций SLD описывается групповым пуассоновским процессом с показателем λ . Каждое сообщение, поступающее в этом процессе, передается с помощью нескольких A-MPDU (англ.: aggregate MAC protocol data unit). Для SLD число таких A-MPDU равномерно распределено на отрезке $[K_{min}, K_{max}]$. Длительность передачи A-MPDU не зависит от канала и занимает случайное время, распределенное равномерно на отрезке $[D_{min}, D_{max}]$. Значения параметров, используемых при моделировании, представлены в Таблице 1. Таким образом трафик всех SLD параметризуется числами

$$\{\lambda, K_{min}, K_{max}, D_{min}, D_{max}\}.$$

При прочих постоянных параметрах насыщенный трафик SLD можно получить, выставив значение показателя $\lambda \gg \frac{1}{K_{min}D_{min}}$, при котором кадры поступают быстрее, чем передаются. Для NSTR MLD длительность всех передач одинаковая и равняется средней для SLD.

Далее рассматриваются зависимости пропускной способности NSTR MLD S^{MLD} при различных интенсивностях трафика каждого SLD λ для исследуемых алгоритмов управления ожиданием (рис. 1–3). Записи (*SingleLink*, k) и (*SingleLink+*, k) означают использование соответствующих алгоритмов с основным каналом k . Общий характер зависимостей для базовых алгоритмов за исключением *NoWaiting* — это линейное убывание S^{MLD} при росте λ до тех пор, пока трафик SLD в каналах, где работает алгоритм, не станет насыщенным. На некоторых

Таблица 1. Параметры моделирования

Параметр	Значение
Емкость первого канала, C_1	350 Мбит/с
Емкость второго канала, C_2	350–1400 Мбит/с
Число кадров, поступающих на SLD, $[K_{min}, K_{max}]$	[2, 10]
Длительность передачи SLD, $[D_{min}, D_{max}]$	[1300, 2000] мкс
Длительность передачи MLD	1650 мкс
Время эксперимента	20 с
Количество измерений каждого сценария	5
Период обновления режима, T	165 мс
Пороговое значение частоты совместных передач, ν^{TH}	$20/T \approx 121$ Гц
Пороговая разница S_k^{SL+} для переключения, α^{TH}	5 %

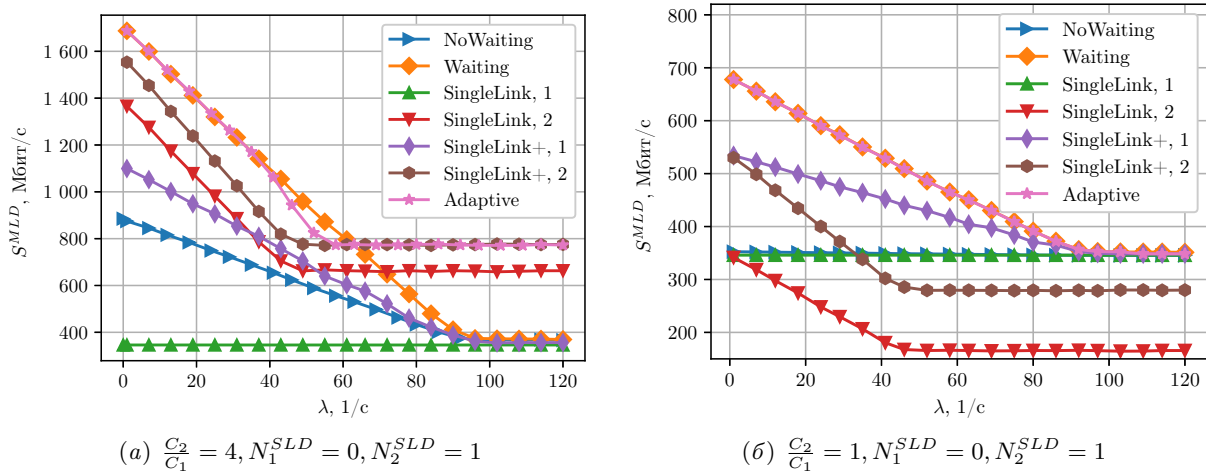


Рис. 1. Сравнение алгоритмов в случае с одним пустым каналом

кривых, например (SingleLink+, 1) на рис. 3, наблюдаются два изгиба, которые соответствуют переходу в насыщение трафика SLD сначала на одном канале, затем на другом. При этом значение S^{MLD} в условии насыщенного трафика SLD для SingleLink согласуется с формулой (1) на всех графиках. Рассмотрим поочередно представленные алгоритмы.

Алгоритм NoWaiting ни в одном сценарии не показывает лучший результат. Даже при $\lambda = 0$ (см. рис. 1, 2, 3) алгоритм практически не осуществляет совместные передачи, в то время как они технически возможны. В области малых нагрузок Waiting совершает частые совместные передачи, и тем самым обеспечивает прирост пропускной способности NSTR MLD относительно NoWaiting вплоть до двукратного.

Для сравнения SingleLink, SingleLink+ и Waiting рассмотрим две характерные ситуации: в одном *пустом* канале не работают SLD (рис. 1) и оба канала заняты SLD (рис. 2, 3). Из графиков видно, что эффективность SingleLink+ превосходит SingleLink, что объясняется более частыми совместными передачами. По этой причине превосходство SingleLink+ особенно выражено при малой интенсивности трафика SLD. Когда один из каналов пустой, например первый, пропускная способность (SingleLink+, 2) выше по сравнению с (SingleLink, 2), на 120–170 Мбит/с, как показано на рис. 1. В таком случае почти каждый раз, когда при использовании (SingleLink+, 2) истекла отсрочка во втором канале, есть возможность сделать совместную передачу и на первом пустом канале, в отличие от (SingleLink, 2). Если же трафик SLD в обоих каналах насыщенный (рис. 2, 3), то отличие составляет менее 1%, поскольку ве-

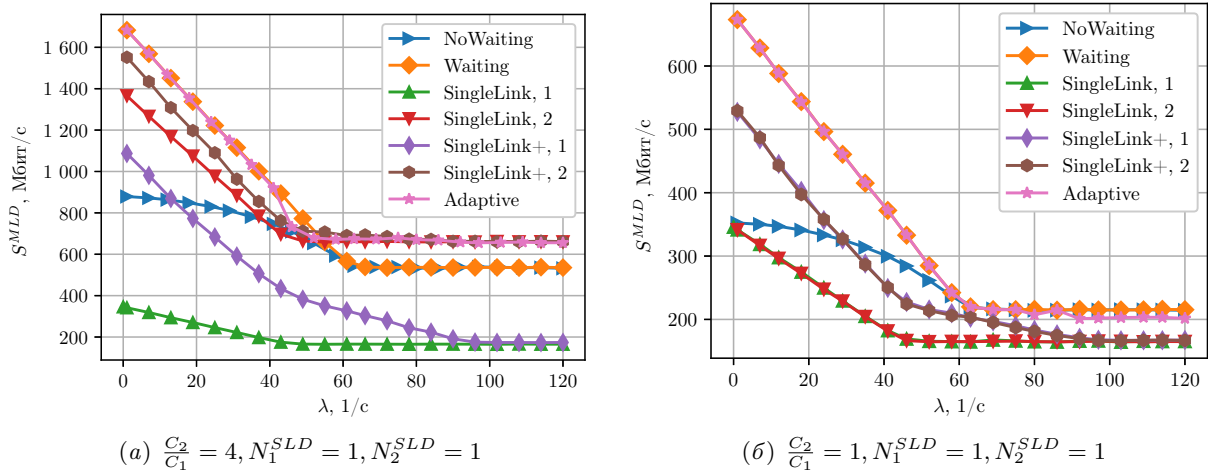


Рис. 2. Сравнение алгоритмов в случае с непустыми каналами и равном числе SLD в каналах

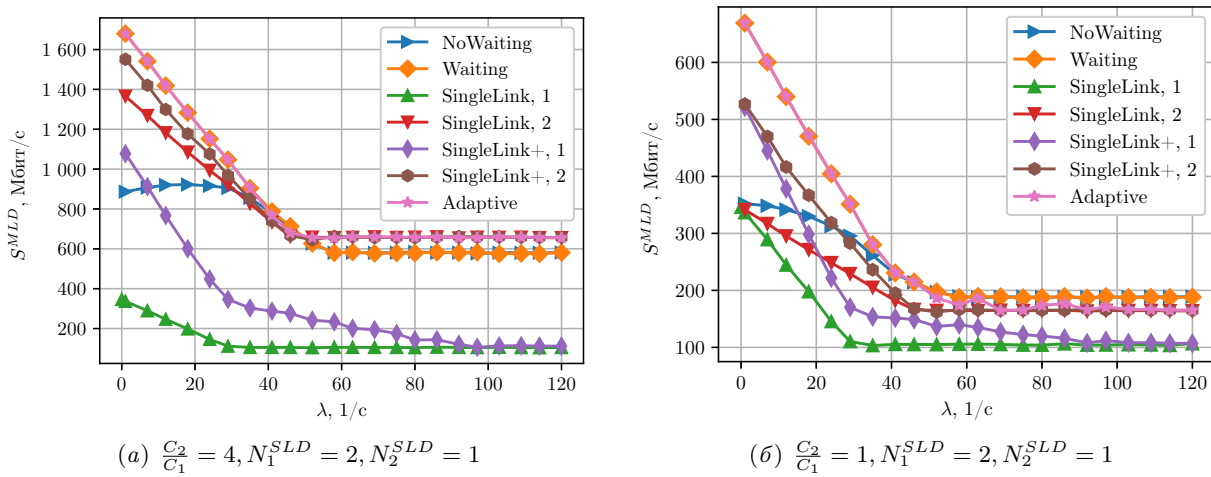


Рис. 3. Сравнение алгоритмов в случае с непустыми каналами и разным числе SLD в каналах

роятность того, что обе процедуры отсрочки NSTR MLD истекнут одновременно, крайне мала, и совместные передачи редки для SingleLink+.

Однако при малой интенсивности трафика SLD алгоритм Waiting все же более эффективен, чем SingleLink+. Waiting имеет возможность начинать передачу в любом канале, в то время как (SingleLink+, k) осуществляет передачи только при истечении отсрочки в канале k . В то же время, в области насыщенного трафика SLD алгоритм SingleLink+ может обеспечивать большую пропускную способность NSTR MLD, чем Waiting (рис. 2а). Если, например, во втором канале можно достичь гораздо большей пропускной способности, то выгоднее соревноваться за доступ только в нем, что и делает (SingleLink+, 2), в то время как Waiting соревнуется за оба канала в равной степени. При этом эффективность SingleLink+ может быть меньше и даже уступать алгоритму Waiting в условиях насыщенного трафика SLD. Это происходит, если достижимые пропускные способности каналов сближаются, например при увеличении числа станций в быстром канале (рис. 3а) или при равных емкостях каналов (рис. 2б).

Алгоритм Adaptive построен так, чтобы комбинировать преимущества SingleLink+ и Waiting в разных канальных условиях. Сначала рассмотрим случай с пустым первым каналом на рис. 1. При малой относительной разнице емкостей каналов, например на рис. 1б, Waiting

показывает лучший результат, чем SingleLink+, и алгоритм Adaptive совпадает с Waiting. Если емкости каналов сильно отличаются, то SingleLink+ может стать лучше Waiting в случае насыщенного трафика SLD (рис. 1а). Тогда Adaptive переключается на (SingleLink+, 2). Заметим, что в области этого переключения наблюдается проседание эффективности алгоритма Adaptive. В этой области оценка текущей пропускной способности в режиме Waiting регулярно опускается на короткое время, и происходят ошибочные переключения. В итоге наблюдаются колебания между двумя режимами. Поведение алгоритма в этой области чувствительно к аргументам ν^{TH} и T .

Перейдем к случаю, когда в каждом канале есть SLD. Алгоритм Adaptive также демонстрирует наивысшую эффективность в большинстве случаев. В других случаях, для разных по емкости каналов на рис. 2а, 3а, Adaptive алгоритм вновь уступает результату наилучшего базового алгоритма в области перехода. Как и в случае, описанном выше, это происходит из-за частого переключения режимов. При уменьшении относительной разницы емкостей каналов на рис. 2б, 3б адаптивному алгоритму не требуется переключение на SingleLink+. В этой ситуации незначительное снижение пропускной способности Adaptive наблюдается лишь в области насыщенного трафика SLD при использовании алгоритма SingleLink+ с большей пропускной способностью (рис. 2б). Этот эффект связан с тем, что во время кратковременного снижения S^{MLD} происходит переключение на SingleLink+, но канал уже находится в области насыщенного трафика SLD и условие на частоту совместных передач для обратного переключения выполняется не сразу.

Таким образом, за счет учета емкостей каналов и распределения SLD по ним, предложенный адаптивный алгоритм практически всегда показывает пропускную способность NSTR MLD равную пропускной способности лучшего базового алгоритма в каждом отдельном сценарии (рис. 1а, 2а, 3а). Однако в узком диапазоне сценариев наблюдается проигрыш не более 10% относительно лучшего из базовых алгоритмов (некоторые участки на рис. 1б, 2б, 3б). При этом возможно добиться большей пропускной способности NSTR MLD, если изменять параметры T , ν^{TH} и α^{TH} во времени, что планируется сделать в будущих работах.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена проблема выбора лучшего с точки зрения пропускной способности алгоритма управления ожиданием для NSTR MLD из стандарта IEEE 802.11be. Рассмотрены некоторые базовые алгоритмы, однако каждый из них имеет широкие области сценариев, где он неэффективен. Для решения предложен и исследован адаптивный алгоритм управления ожиданием окончания процедур отсрочки при доступе к среде. Предложенный алгоритм, в отличие от базовых решений, учитывает такие параметры, как значения емкости каналов и распределение SLD по ним. С помощью имитационной модели показано, что адаптивный алгоритм почти всегда обеспечивает пропускную способность NSTR MLD, близкую к пропускной способности лучшего базового алгоритма в каждом отдельном сценарии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. "IEEE Draft Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT)," *IEEE P802.11be/D3.0*, стр. 1–999, 2023.
2. E. Khorov, I. Levitsky, and I. F. Akyildiz, "Current status and directions of IEEE 802.11 be, the future Wi-Fi 7," *IEEE access*, vol. 8, стр. 88664–88688, 2020.

3. M. Carrascosa, G. Geraci, E. Knightly, and B. Bellalta, "An experimental study of latency for IEEE 802.11be multi-link operation," in *ICC 2022-IEEE International Conference on Communications*, стр. 2507–2512, IEEE, 2022.
4. K. Huang, L. Huang, Y. Quan, H. Du, C. Luo, L. Lu, and R. Hou, "Mutli-link channel access schemes for IEEE 802.11be extremely high throughput," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 6, no. 3, стр. 46–51, 2022.
5. N. Korolev, I. Levitsky, I. Startsev, B. Bellalta, and E. Khorov, "Study of multi-link channel access without simultaneous transmit and receive in IEEE 802.11be networks," *IEEE Access*, vol. 10, стр. 126339–126351, 2022.
6. S. Naribole, W. B. Lee, S. Kandala, and A. Ranganath, "Simultaneous transmit-receive multi-channel operation in next generation WLANs," in *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, стр. 1–8, IEEE, 2020.
7. Е. Богданов, И. Левицкий, "Адаптивный алгоритм управления ожиданием при доступе к среде для многоканальных устройств Wi-Fi 7," сборник трудов конференции *ИТuС 2023*, 284–286.
8. N. Korolev, I. Levitsky, and E. Khorov, "Performance Evaluation of Multi-Link Single-Radio and Multi-Radio Devices in Heterogeneous Wi-Fi 7 Networks," *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 67, no. Suppl 2, стр. S211–S221, 2022.
9. S. Adhikari and S. Verma, "Analysis of Multilink in IEEE 802.11be," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 6, no. 3, стр. 52–58, 2022.
10. V. Sathya, S. M. Kala, M. I. Rochman, M. Ghosh, and S. Roy, "Standardization advances for cellular and Wi-Fi coexistence in the unlicensed 5 and 6 GHz bands," *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, vol. 24, no. 1, стр. 5–15, 2020.
11. G. Naik, J.-M. Park, J. Ashdown, and W. Lehr, "Next generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz bands: Opportunities and challenges," *IEEE Access*, vol. 8, стр. 153027–153056, 2020.
12. В. Логинов, А. Троегубов, А. Ляхов, and Е. Хоров, "Исследование многоканального метода доступа в сетях NR-U в сценариях совместного существования двух операторов," *Информационные процессы*, vol. 22, no. 3, стр. 141–154, 2022.
13. V. Torgunakov, V. Loginov, and E. Khorov, "A study of channel bonding in IEEE 802.11 bd networks," *IEEE Access*, vol. 10, стр. 25514–25533, 2022.

Study Of Adaptive Waiting Control Algorithm For Channel Access In IEEE 802.11be Networks

D.V. Bankov, E.S. Bogdanov, I.A. Levitsky, V.A. Loginov, E.M. Khorov

To increase throughput of Wi-Fi networks, the IEEE 802.11be standard has introduced a multi-link operation feature that enables devices to transmit and receive data in multiple channels. The article studies an adaptive waiting control algorithm for channel access by multi-link devices (MLDs) incapable of simultaneous transmission and reception (NSTR) at different channels. The algorithm features accounting for the channel capacities, the number of single-link devices in the network and the traffic intensity in the channels. The simulation shows high performance of the proposed algorithm.

KEYWORDS: Wi-Fi 7, IEEE 802.11be, multi-link, NSTR.