

## Оценка производительности многоканальных устройств с одним и несколькими радиointерфейсами в гетерогенных сетях Wi-Fi 7

Н.Ю. Королев<sup>\*,\*\*</sup>, И.А. Левицкий<sup>\*\*\*</sup>, Е.М. Хоров<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Московский исследовательский центр Huawei, Москва

<sup>\*\*</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Москва

<sup>\*\*\*</sup>Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва

Поступила в редколлегию 01.11.2022 г., Принята 07.12.2022 г.

**Аннотация**—Стандарт IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) локальных беспроводных сетей, разрабатываемый на момент написания статьи, позволиткратно увеличить пропускную способность и уменьшить задержки по сравнению с предыдущим стандартом IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6). Одним из главных нововведений IEEE 802.11be, позволяющих достичь этого, является встроенная поддержка многоканальной передачи, причем для этого могут использоваться один или несколько радиointерфейсов. При использовании одного радиointерфейса устройство способно быстро переключать его из занятого канала в свободный, снижая задержку доступа к каналу, однако передача может вестись только в одном канале. Использование нескольких радиointерфейсов позволяет передавать данные в нескольких каналах одновременно, однако радиointерфейсы могут создавать помехи друг другу, для борьбы с которыми стандарт описывает режим работы, когда в нескольких каналах проводится или совместная синхронная передача, или совместный синхронный прием сигнала. В статье разрабатываются алгоритмы переключения единственного радиointерфейса многоканального устройства, позволяющие повысить его пропускную способность, а также сравнивается производительность многоканальных устройств с одним и несколькими радиointерфейсами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** IEEE 802.11be, Wi-Fi 7, множественный доступ, многоканальное устройство с одним радиointерфейсом (MLSR), многоканальное устройство с несколькими радиointерфейсами (MLMR), гетерогенная сеть.

**DOI:** 10.53921/18195822\_2022\_22\_4\_319

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних десятилетий беспроводные сети Wi-Fi прочно вошли в нашу жизнь, обеспечивая доступ в интернет для сотен миллионов людей по всему миру. Увеличивается объем генерируемых данных современными приложениями, которые накладывают более жесткие требования к пропускной способности и временным задержкам сетей. В частности, к таким приложениям относятся приложения виртуальной и дополненной реальности (англ.: virtual and augmented reality, AR and VR), приложения потоковой передачи высокого разрешения. Для удовлетворения их потребностей рабочая группа IEEE 802.11 комитета по стандартизации разрабатывает новые дополнения к стандарту Wi-Fi.

В настоящее время разрабатывается дополнение IEEE 802.11be для технологии Wi-Fi 7 [1,2], которое позволяет более эффективно и гибко использовать имеющиеся ресурсы для удовлетворения требований к качеству обслуживания в сетях Wi-Fi, чем, например, предыдущее

поколение — IEEE 802.11ax [3, 5]. Помимо масштабирования производительности с помощью удвоения ширины полосы со 160 МГц до 320 МГц, IEEE 802.11be описывает многоканальные устройства (англ.: Multi-Link Device, MLD) [4].

Многоканальные устройства могут устанавливать соединения между собой сразу в нескольких каналах (в том числе в разных диапазонах: 2,4 ГГц, 5 ГГц и 6 ГГц) и передавать данные по ним, балансируя нагрузку. В частности, многоканальное устройство может провести первую попытку передачи кадров данных в одном канале, а все повторные попытки проводить в другом. Более того, прием кадра блочного подтверждения может быть проведен в канале, отличном от того, с помощью которого изначально был передан кадр данных. В общем случае, одновременное использование нескольких каналов позволяет существенно увеличить пропускную способность беспроводной сети и снизить задержку, что, в свою очередь, улучшает качество обслуживания трафика.

Многоканальные устройства могут иметь один или несколько радиointерфейсов и называются соответственно MLSR (англ. Multi-Link Single-Radio) и MLMR (англ. Multi-Link Multi-Radio). Устройства MLMR могут работать в двух режимах:

1. **STR** (англ.: Simultaneous Transmission and Reception) режим. В нем многоканальное устройство может работать в нескольких каналах асинхронно и независимо, обладая возможностью одновременного приема сигнала в одном канале и передачи другого сигнала в другом канале.
2. **NSTR** (англ.: Non-Simultaneous Transmission and Reception) режим. В некоторых случаях [6], таких как недостаточная изоляция антенн между собой, малый размер устройства, простые фильтры или слишком малое спектральное расстояние между радиочастотными каналами, передача сигнала в одном канале может вызвать межканальную интерференцию, препятствующую приему другого сигнала в другом канале. Пример такой межканальной интерференции изображен на рис. 1, где принимаемый сигнал от точки доступа AP (англ. Access Point) не может быть успешно декодирован клиентским многоканальным устройством по AP из-за одновременной передачи.

Невозможность использования режима STR в таких случаях является важной проблемой, для решения которой в режиме NSTR избегаются ситуации, когда происходит одновременная передача в одном канале и прием в другом канале. Для этого разрешается только такие одновременные передачи кадров в нескольких каналах, когда совпадают их начала и концы. В работе такую передачу назовем *совместной*.

Стоит отметить, что многоканальное устройство может иметь разные режимы работы для разных пар каналов, например, оно может работать в режиме STR в двух каналах, спектральное расстояние между которыми достаточно большое, и в режиме NSTR — в двух каналах с меньшим спектральным расстоянием между ними.

Поскольку MLSR устройства имеют только один радиointерфейс, они могут передавать или принимать данные только в одном канале одновременно. При этом когда радиointерфейс работает в одном канале, состояние другого канала устройству неизвестно: переключившись в этот канал, устройство должно прослушать канал в течение некоторого времени, чтобы понять, занят ли канал физически или виртуально или нет. Поэтому эффективность работы MLSR существенно зависит от алгоритма переключения радиointерфейса между каналами.

Для полноты картины стоит отметить, что стандарт также описывает «улучшенные» (англ.: enhanced) многоканальные устройства: EMLSR и EMLMR, которые в статье не рассматриваются. Устройство EMLSR может прослушивать одновременно несколько каналов, но может передавать только в одном. Устройство EMLMR может динамически переназначать антенны с одного канала на другой, управляя тем самым возможным числом пространственных потоков MIMO (англ.: Multiple-In-Multiple-Output). Например, при ожидающейся передаче данных



Рис. 1. Межканальная интерференция.

большого объема на одном канале, все антенны устройства могут быть переназначены на этот канал. При этом устройство EMLMR может всегда оставлять как минимум одну антенну на каждом канале, чтобы не терять информацию об их состоянии. Отметим, что для EMLSR и EMLMR режимов подразумевается использование MIMO.

Аналитическое и имитационное исследование эффективности многоканальных устройств Wi-Fi 7 уже привлекло внимание академического сообщества [7, 8]. Однако в подобных работах, как правило, либо не подразумевается наличие в сети устройств предыдущих поколений, либо рассматривается только режим STR. Однако в наших предыдущих работах с аналитическим [9] и имитационным [10] моделированием отсутствуют вышеобозначенные недостатки. Обсуждение принципов работы режима MLSR с активным использованием одного канала и некоторых аспектов его производительности проходит только в рамках рабочей группы по стандартизации IEEE 802.11 TGe [11, 12], при этом отсутствуют какие-либо научные работы, касающиеся производительности этого режима.

В данной работе впервые сравнивается производительность устройств MLMR и MLSR. Кроме того, для режима MLSR предлагаются два алгоритма переключения между различными каналами, позволяющие существенно повысить пропускную способность по сравнению с одноканальными устройствами.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приводится более подробное описание исследуемых многоканальных методов множественного доступа, а также предлагаемые алгоритмы переключения каналов для MLSR режима. В разделе 3 описывается исследуемый сценарий работы сети Wi-Fi, а также приведены численные результаты ее имитационного моделирования и их анализ. Заключение работы содержится в разделе 4.

## 2. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА

### 2.1. Доступ к каналу

Исследуемые многоканальные методы множественного доступа расширяют метод EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access) [13], который является основным методом доступа в современных сетях Wi-Fi.

EDCA поддерживает дифференцированное обслуживание различных типов трафика. Для этого все пакеты делятся на четыре категории доступа: AC\_VO (голос), AC\_VI (видеопотоки), AC\_BE (наилучшее обслуживание) или AC\_BK (фоновый трафик), каждой из которых соответствует отдельная очередь пакетов. Для передачи пакетов из каждой очереди исполь-

зается один и тот же алгоритм доступа к каналу, но с разными параметрами. Опишем этот алгоритм для произвольной очереди.

После завершения очередной передачи пакета и перед началом передачи следующего пакета используется случайная задержка (отсрочка). Для этого станция инициализирует значение счетчика отсрочки, случайным целым числом, равновероятно выбираемым на отрезке  $[0, CW]$ , где  $CW$  — это значение конкурентного окна (англ.: Contention Window, CW). Счетчик отсрочки уменьшается на единицу каждый слот  $\sigma$  (слотом времени), когда канал был свободным. Когда же канал становится занятой, значение счетчика отсрочки *замораживается*.

Станция возобновляет уменьшение счетчика после того, как канал был свободным в течение интервала времени  $AIFS = SIFS + \sigma \cdot AIFSN$ , если до этого в канале был высокий уровень шума или в канале передавался кадр, который станция смогла успешно декодировать. Если же станция не смогла успешно декодировать принимаемый кадр, то процедура уменьшения значения счетчика отсрочки может начаться только спустя время  $EIFS - DIFS + AIFS$ , где  $SIFS$  (англ.: Short Interframe Space) и  $EIFS$  (англ.: Extended Interframe Space) — длительности короткого и расширенного межкадрового интервала соответственно, а  $AIFSN$  — целочисленный параметр категории доступа.

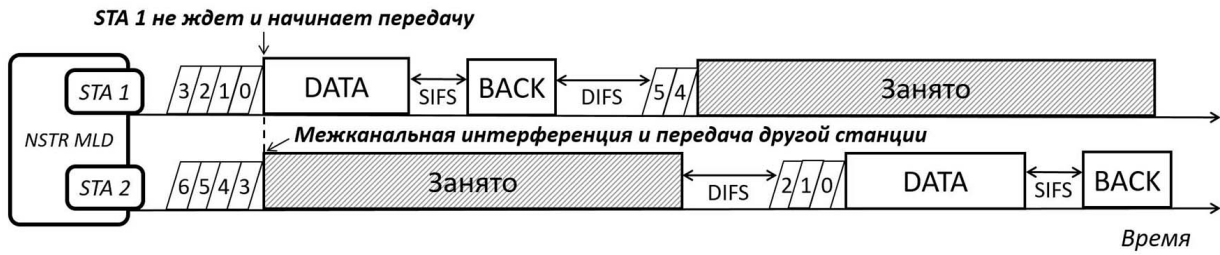
Как только значение счетчика отсрочки становится равным нулю, станция начинает попытку передачи очередного кадра. Если станция получает в ответ через  $SIFS$  кадр подтверждения АСК, то попытка считается успешной и станция устанавливает значение конкурентного окна  $CW$  равным  $CW_{min}$ . В противном случае станция удваивает текущее значение конкурентного окна  $CW$ , если оно еще не достигло своего максимального значения  $CW_{max}$ . Различным категориям доступа соответствуют различные параметры метода EDCA, такие, как  $AIFSN$ ,  $CW_{min}$  и  $CW_{max}$ .

Также для более эффективного использования канальных ресурсов может быть использована агрегация нескольких пакетов в один кадр. Так, при использовании агрегации А-MPDU (англ.: Aggregated MAC Protocol Data Units — агрегированные элементы данных протокола управления доступом к каналу) станция может передавать несколько пакетов данных как один кадр, при этом снижая накладные расходы на их передачу, вызванные протоколами физического уровня PHY (англ.: Physical Layer) и канального уровня MAC (англ.: Medium Access Control, управление доступом к каналу). Как правило, принимающая станция отвечает кадром блочного подтверждения ВАСК (англ.: Block Acknowledgement), в котором указаны идентификационные номера успешно принятых пакетов.

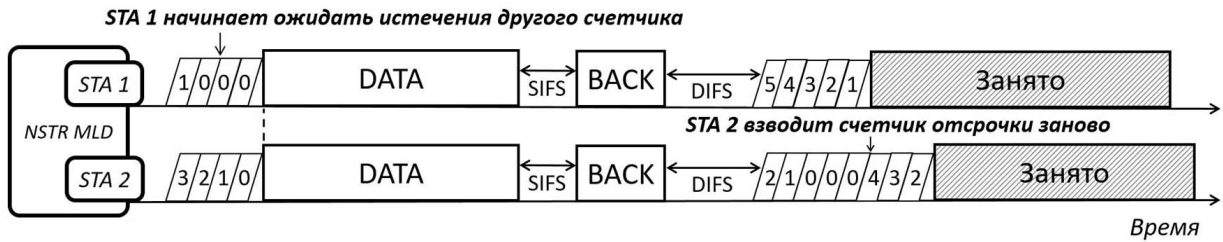
## 2.2. Схемы доступа к каналу для устройств, работающих в режиме MLMR

Устройства MLMR, позволяющие осуществлять одновременную передачу сигнала в нескольких каналах и использующие различные радиоинтерфейсы, можно представить, как состоящие из двух станций (англ.: STA) Wi-Fi, каждой из которых соответствует свой радиоинтерфейс.

Устройства, имеющие возможность работать в режиме STR, могут добиться практически полной независимости работы связанных станций в отдельных каналах. Поэтому методы доступа к каналу в данном режиме не меняются в IEEE 802.11be. В случае же режима NSTR протокол IEEE 802.11be модифицирует правила доступа к каналу для обеспечения одновременной работы в различных каналах. Рассмотрим устройство MLMR в режиме NSTR с двумя связанными станциями: STA 1 и STA 2. Каждая станция отдельно управляет своими счетчиками отсрочки. Однако при передаче сигнала одной станцией другая станция не может прослушивать канал, и потому замораживает счетчик отсрочки по крайней мере до окончания передачи (см. рис.2а). После окончания передачи счетчик отсрочки может остаться замороженным, если происходит детектирование мощности принимаемого сигнала в канале выше энергетического порога занятости канала (англ.: Energy Detection Threshold).



(a) Связанные станции не ждут друг друга.



(b) Связанные станции ждут друг друга.

**Рис. 2.** Примеры передачи многоканальным устройством.

Стандарт позволяет осуществлять совместные передачи в обоих каналах лишь в случае, когда счетчики отсрочки обеих станций достигают нуля. Поэтому когда счетчик отсрочки, например, только STA 1 достигает нуля, многоканальное устройство должно принять решение согласно одной из двух следующих опций:

- Опция 1** — STA 1 начинает передачу в своем канале немедленно, см. рис. 2а, где видно, что STA 1 не ждет STA 2 после того, как ее счетчик отсрочки стал равным нулю;
- Опция 2** — STA 1 ожидает отсрочки на STA 2.

Отметим, что в этом случае, если канал, в котором работает STA 2, был свободен, то STA 1 откладывает передачу в своем канале, заморозив собственный счетчик отсрочки на нуле до тех пор, пока счетчик отсрочки STA 2 не дойдет до нуля. Когда это происходит, STA 1 и STA 2 начинают совместную передачу. Если канал для STA 2 был занят изначально, STA 1 начинает передачу немедленно, аналогично Опции 1. Если в процессе ожидания канал STA 2 становится занятым, то STA 1 вынуждена заново взвести счетчик случайной отсрочки без смены размера окна. Назовем конкурентным периодом интервал времени между двумя последовательными попытками передачи. На рис. 2b показан пример работы многоканального устройства, когда многоканальное устройство принимает решение ожидать истечение счетчика. В первом конкурентном периоде STA 1 успешно дожидается истечение счетчика STA 2, после чего многоканальное устройства проводит успешную совместную передачу. Во втором конкурентном периоде STA 2 ожидает истечение счетчика STA 1, но STA 1 проигрывает соревнование за доступ к каналу, поэтому STA 2 приходится взводить свой счетчик случайной отсрочки заново.

В данной работе рассмотрим схемы доступа к каналу в режиме NSTR, при которых Опция 1 или Опция 2 выбирается динамически в зависимости от времени ожидания. Если у одной станции счетчик отсрочки стал равным нулю, а канал другой станции свободен и ее счетчик отсрочки не больше  $T$ , то выбирается Опция 2. В противном случае выбирается Опция 1. Таким образом, каждую схему в семействе охарактеризуем целым неотрицательным числом  $T$ . Рис. 2а соответствует схемам с  $T \leq 2$ .

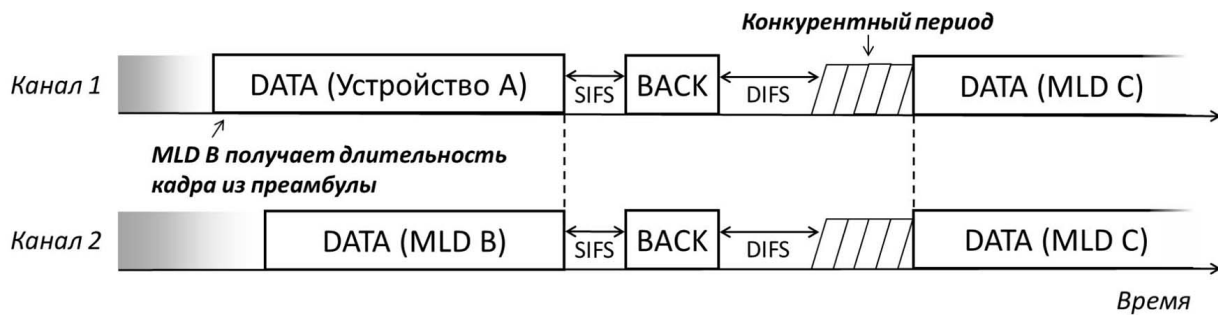


Рис. 3. Пример выравнивания кадров.

В дополнение к описанным методам доступа, рассмотрим вспомогательный механизм *выравнивания кадров*, работающий следующим образом. При передаче в одном из каналов, когда второй занят сторонним устройством, многоканальное устройство так фрагментирует или агрегирует данные, что окончание его кадра в первом канале оказывается выровненным по отношению к передаче, происходящей во втором канале. Благодаря такому выравниванию оба канала освобождаются одновременно, что потенциально должно повысить вероятность устройствам NSTR провести совместную многоканальную передачу. Например, на рис. 3 некоторое устройство А (необязательно многоканальное) начинает передачу кадра в Канале 1 и многоканальное устройство В, работающее в Каналах 1 и 2, узнает его длительность. Согласно стандарту IEEE 802.11, эту длительность можно вычислить, зная используемую сигнально-кодировую конструкцию и длину содержимого кадра в байтах. Оба данных параметра содержатся в поле L-SIG преамбулы физического уровня. Зная длительность этого кадра и оставшееся время до начала собственной передачи кадра, многоканальное устройство В может подобрать его длительность таким образом, чтобы передача кадров в обоих каналах закончилась практически в одно и то же время (с разницей в не более, чем 4–8 мкс). В итоге оба канала одновременно становятся свободными, что позволяет любому устройству NSTR, такому как MLD C, провести одновременную передачу в обоих каналах.

### 2.3. Схемы доступа к каналу для устройств, работающих в режиме MLSR

Устройство, работающее в режиме MLSR, может принимать и передавать кадры только в одном, *активном* канале одновременно. Такое устройство, подключенное к одной многоканальной точке доступа (англ.: Access Point, AP) по нескольким каналам, может иногда переключаться между ними, тем самым меняя активный канал. При переключении активного канала необходима процедура синхронизации с состоянием нового канала, чтобы предотвратить коллизии с текущими кадрами, преамбула которых была пропущена. Процедура заключается в непрерывном прослушивании канала до момента обнаружения первой преамбулы кадра Wi-Fi или в течении максимальной длительности передачи. Многоканальное устройство MLSR поддерживает отдельный счетчик отсрочки для каждого канала. При смене активного канала устройство замораживает счетчик отсрочки соответствующего канала и размораживает его при последующем возвращении в канал.

Обратим внимание, что при проигрыше соревнования за доступ к каналу устройство MLSR в принципе может декодировать чужие кадры и вычислить время, через которое начнется следующий конкурентный период в этом канале. Если оно смогло успешно принять короткий кадр Request To Send (RTS) или Clear To Send (CTS), то оно может вычислить начало следующего конкурентного периода, прочитав из этого кадра длительность виртуальной занятости. Если же принимаемый кадр является кадром с данными (DATA), то его длительность можно рас-

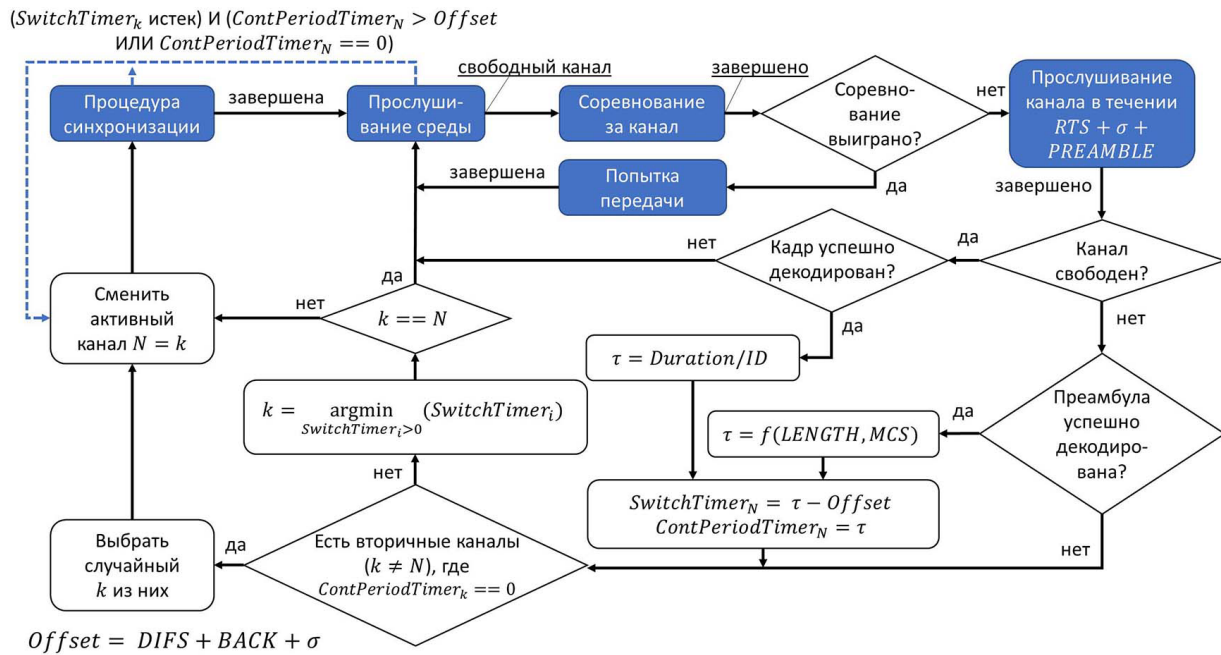


Рис. 4. Предлагаемая схема переключения активного канала.

считать исходя из информации в физическом заголовке кадра, аналогично тому, как описано в разделе 2.1.

Отметим, что в случае коллизии двух кадров RTS (при использовании механизма RTS/CTS) переключения активного канала не происходит. Такое событие многоканальное устройство может обнаружить, прослушивая активный канал по крайней мере  $RTS + \sigma + PREAMBLE$ , где  $RTS$  — длительность RTS кадра, а  $PREAMBLE$  — длительность преамбулы. Если же по истечении данного времени не произошло корректного детектирования преамбулы физического уровня, то информация о начале следующего конкурентного периода становится недоступной. Такое может произойти, например, в случае, когда по крайней мере один из кадров, попавших в коллизию, является длинным кадром DATA с данными.

Таким образом, многоканальное устройство может поддерживать информацию о начале следующего конкурентного периода в нескольких каналах. В предлагаемых алгоритмах смена канала происходит в двух случаях.

- Смена активного канала может произойти спустя период  $RTS + \sigma + PREAMBLE$  после проигрыша соревнования за доступ к каналу при условии, что за этот период была успешно декодирована преамбула физического уровня кадра, передаваемого в канале. При этом если известна актуальная информация о начале следующего конкурентного периода в обоих каналах и в активном канале конкурентный период начнется быстрее, то переключения канала не происходит. В противном случае происходит смена активного канала.
- Переход в другой канал может произойти за время  $DIFS + BACK + \sigma$  до предполагаемого начала конкурентного периода в этом канале. Этот момент времени соответствует одному слоту длительностью  $\sigma$  перед началом передачи кадра подтверждения BACK. Переключившись на рассматриваемый канал и приняв BACK, многоканальное устройство синхронизируется с состоянием каналом и может соревноваться за доступ в канал. Переключение не происходит, если многоканальное устройство уже находится в конкурентном периоде в

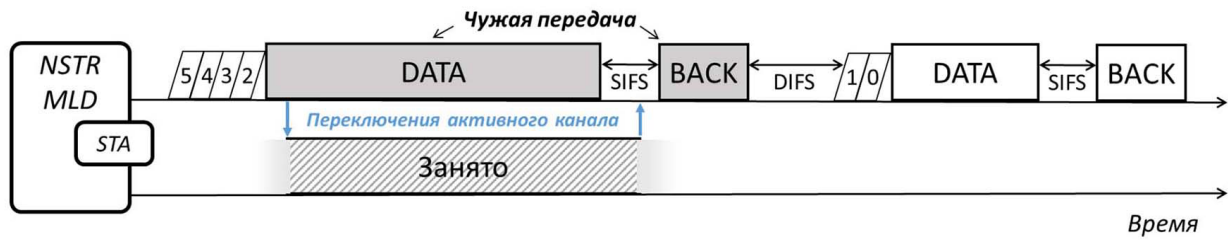


Рис. 5. Пример работы устройства MSLR в схеме с возвратом.

текущем активном канале, или конкурентный период в активном начале начнется раньше, чем в другом канале, или многоканальное устройство в данный момент уже выиграло соревнование за доступ к каналу и передает кадр.

Пример переключений для обоих случаев проиллюстрирован на рис. 5. Здесь многоканальное устройство проигрывает соревнование за эфир и переключается на другой канал, вычислив начало следующего конкурентного периода в исходном канале на основе успешно принятой преамбулы физического уровня. Не дождавшись освобождения нового канала происходит обратное переключение на исходный канал за время  $\sigma$  до начала передачи BACK кадра. Далее после успешной синхронизации с исходным каналом, многоканальное устройство выигрывает соревнование за доступ к каналу и успешно инициирует передачу.

При использовании более чем двух каналов при многоканальной передаче требуются уточнения относительно того, какой из неактивных каналов стоит выбрать при переключении. В качестве одного из вариантов можно переключиться случайно на один из вторичных каналов, про который нет актуальной информации о начале следующего конкурентного периода. Если же про все неактивные каналы такая информация имеется, то выбирается канал с наименьшим началом следующего конкурентного периода. При этом среди вторичных каналов рассматриваются только те, в которых конкурентный период настанет не раньше, чем через  $DIFS + BACK + \sigma$ .

В данной работе рассматривается устройство MSLR, работающие в двух каналах, а также предлагаются и сравниваются два алгоритма переключения между двумя каналами:

1. **Алгоритм без возврата.** В данном алгоритме смена канала может произойти только в первом случае, описанном выше, т.е. спустя период времени  $RTS + \sigma + PREAMBLE$  после проигрыша соревнования за доступ к каналу. Таким образом, не происходит возврата в канал, описанного выше в случае, изображенном на рис. 5.
2. **Алгоритм с возвратом** В этом алгоритме смена канала может произойти в обоих случаях, описанных выше.

На рис. 4 показана блочная схема вышеописанных алгоритмов переключения активного канала. В ней состояния системы обозначаются темными блоками, в светлых блоках проводятся некоторые действия и сразу же совершается дальнейший переход из них. В схеме имеются таймеры  $SwitchTimer_i$  и  $ContPeriodTimer_i$  ( $i$  — номер канала), которые при их взведении со временем непрерывно истекают до нуля. Первый из них соответствует возможной смене активного канала за время  $DIFS + BACK + \sigma$  до предполагаемого начала конкурентного периода в некотором канале. Второй соответствует началу следующего конкурентного периода при наличии информации о нем. Переход по любой из пунктирных стрелок может произойти в момент истечения счетчика  $SwitchTimer_i$ , если система находится в состоянии процедуры



Таблица 1. Параметры имитационного моделирования

Параметр	Значение
Размер данных в одном MPDU	1500 байт
Ширина каждого канала	80 МГц
Сигнально-кодовая конструкция (СКК)	4
$CW_{min}$	15
$CW_{max}$	1023
$AIFS$	34 мкс
Максимальное количество повторных попыток передач	7
Время имитации	100 с

синхронизации или прослушивания канала. Алгоритму с возвратом соответствует полная схема, а алгоритму без возврата — та же схема, но без пунктирных стрелок.

### 3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Рассматриваемый сценарий

Рассмотрим гетерогенную Wi-Fi сеть с устройствами разных поколений. Будучи ключевым устройством в сети, подразумевается, что точка доступа поддерживает работу в режиме STR в двух каналах: Канале 1 и Канале 2. Кроме точки доступа имеется  $N_1$  и  $N_2$  пользовательских одноканальных устройств, работающих в Канале 1 и Канале 2, соответственно, а также  $N_3$  пользовательских многоканальных устройств, работающих в обоих каналах. Таким образом, рассматриваемые сценарии характеризуются тройкой  $[N_1, N_2, N_3]$ .

Пользовательские устройства передают кадры данных MPDU (англ.: MAC Protocol Data Unit) с помощью механизма агрегации A-MPDU. Количество кадров MPDU, агрегируемых в A-MPDU, является случайным и выбирается из равномерного распределения  $U[50, 64]$ . Остальные параметры имитационного моделирования указаны в таблице 1.

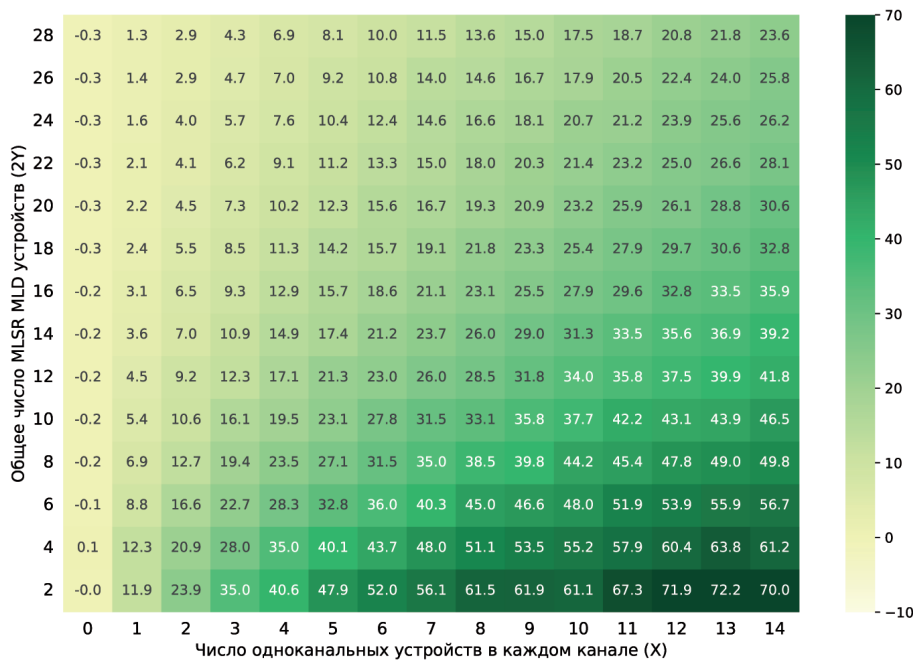
Во всех рассматриваемых далее случаях пользовательские устройства имеют насыщенный трафик на передачу в восходящем канале, принадлежащий одной и той же EDCA категории доступа. Точка доступа не имеет данных на передачу в нисходящем канале, и отправляет лишь CTS кадры (в случае использования механизма RTS/CTS) и кадры блочного подтверждения BACK.

Имитационное моделирование проводилось с помощью симулятора, в основе которого лежит общедоступный симулятор NS-3. Были реализованы все вышеописанные схемы доступа, соответствующие режимам NSTR и MLSR. Все устройства в сети находятся в области радиовидимости друг друга, отсутствуют скрытые станции, а также отсутствует интерференция от соседних Wi-Fi сетей.

#### 3.2. Сравнение производительности устройства MLSR и одноканального устройства

Сравним производительность устройства MLSR и одноканальных устройств. Для этого рассмотрим сценарий, в котором  $N_1 = N_2$ , т.е. количество одноканальных устройств в обоих каналах равно. Сравним две следующие величины:

1. Средняя пропускная способность многоканального устройства, в сценарии с конфигурацией  $[N_1, N_2, N_3] = [X, X, 2Y]$ ;
2. Средняя пропускная способность одноканальных устройств в сценарии с конфигурацией  $[X + Y, X + Y, 0]$ .

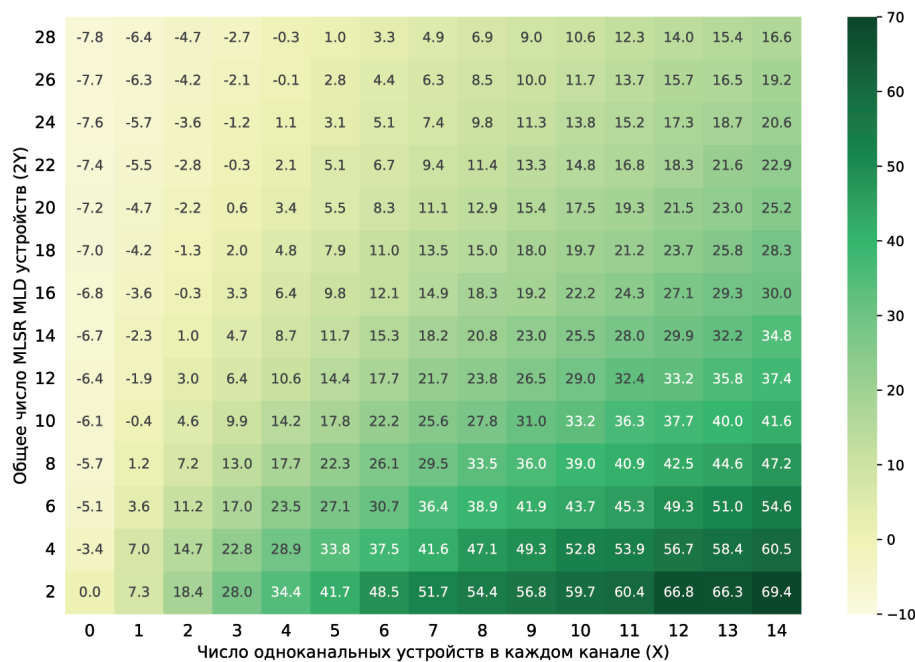


**Рис. 6.** Прирост пропускной способности устройства MLRS по сравнению с одноканальными устройствами (%); механизм RTS/CTS включен.

Сравнение этих величин соответствует тому, что в сценарии с конфигурацией  $[X, X, 2Y]$  имеется  $2Y$  двухканальных устройств, каждое из которых заменяется на одноканальное устройство, после чего все многоканальные устройства поровну распределяются между двумя каналами. Далее сравниваются пропускные способности многоканальных устройств до их замены на одноканальные устройства и после. При этом особый интерес вызывают случаи с большими значениями  $N_3$ , поскольку в сценарии  $[X, X, 2Y]$  имеется существенно большее число устройств, участвующих в соревновании за доступ к обоим каналам, в сравнении со сценарием  $[X + Y, X + Y, 0]$ , а, значит, может происходить большее число коллизий, которые могут иметь негативное влияние на производительность многоканальных устройств до их замены.

На рис. 6 проиллюстрирован относительный прирост пропускной способности многоканальных устройств MLRS по отношению к одноканальным устройствам при включенном механизме RTS/CTS. Многоканальные устройства используют алгоритм переключения активного канала с возвращением. Если многоканальное устройство до замены его на одноканальное имеет пропускную способность 60 Мбит/с, а после она падает до 50 Мбит/с, то значение в соответствующей ячейке таблицы равно  $100\% \cdot \left(\frac{60}{50} - 1\right) = 20\%$ .

Главное наблюдение состоит в том, что при фиксированном количестве  $2Y$  многоканальных устройств относительный прирост пропускной способности тем выше, чем больше одноканальных устройств ( $X$  в каждом из каналов) находится в сети. Это объясняется тем, что для выделенного многоканального устройства вероятность выигрыша в конкурентном периоде уменьшается при увеличении  $X$ . Это означает, что доля конкурентных периодов в обоих каналах, в которых участвует многоканальные устройства, также растет. Таким образом, каждое многоканальное устройство пропускает все меньший процент конкурентных периодов с увеличением  $X$ , а значит, и пропускная способность многоканального устройства по отношению



**Рис. 7.** Прирост пропускной способности устройства MLSR по сравнению с одноканальными устройствами (%); механизм RTS/CTS выключен.

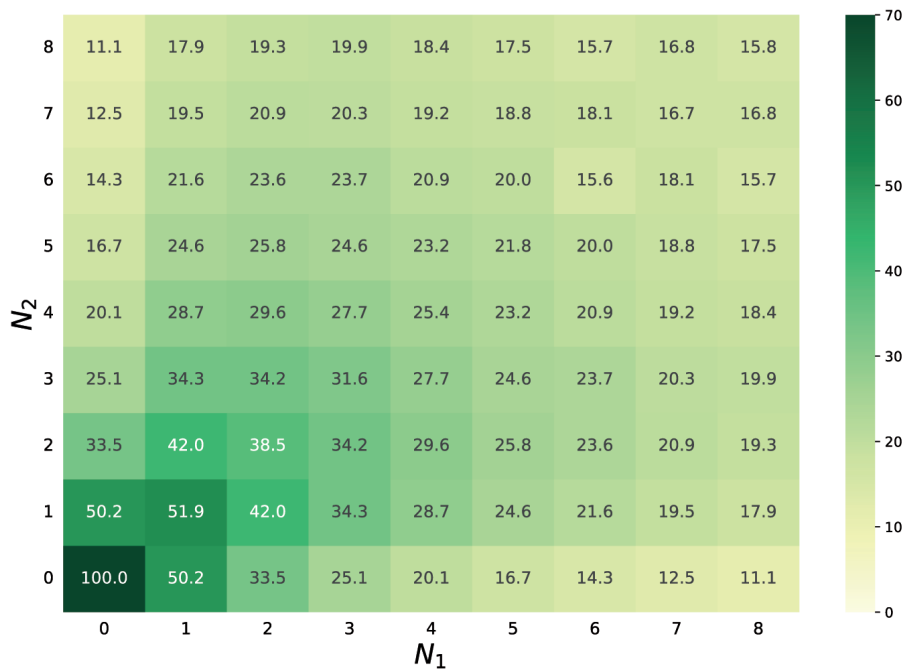
к одноканальному также растет, ибо каждое одноканальное устройство участвует в половине конкурентных периодов обоих каналов вне зависимости от значения  $X$ . При этом общая пропускная способность сети практически не меняется.

Если же зафиксировать число одноканальных устройств  $X$  в каждом канале, то выигрыш от использования многоканальных устройств уменьшается при увеличении их числа. Это происходит из-за возрастающей конкуренции за доступ к каналу со стороны других многоканальных устройств, ведь все многоканальные устройства переключаются с одного канала на другой с целью участия в как можно большем числе конкурентных периодов.

Прирост пропускной способности устройства MLSR может превышать 70%, и, уже отмечено, тем прирост больше, чем выше значение  $X$  и ниже значение  $Y$ .

Стоит отдельно отметить первый столбец на рис. 6, соответствующий  $X = 0$ , т.е. отсутствию одноканальных устройств перед заменой многоканального устройства на одноканальные устройства. В этих случаях имеется едва заметный проигрыш многоканальных устройств. В этом случае происходит больше коллизий между многоканальными устройствами, чем между одноканальными устройствами после замены. При этом многоканальное устройство не получают больше временных канальных ресурсов до их замены, поскольку и так все эти ресурсы распределены между ними в силу отсутствия одноканальных устройств. Однако использование механизма RTS/CTS позволяет существенно уменьшить длительность коллизий, из-за чего проигрыш является едва заметным.

Описанные в разделе 2.3 два алгоритма переключения каналов устройств MLSR, показывают близкую производительность: разница в пропускной способности не превышает 1%. Поскольку в данном случае разброс длин A-MPDU от 50 до 64 небольшой, то после переключения канала (вследствие проигрыша соревнования за доступ к каналу) вероятность то-



**Рис. 8.** Прирост пропускной способности устройств MLMR в режиме STR по сравнению с устройствами MLSR с использованием алгоритма с возвращением (%); механизм RTS/CTS включен.

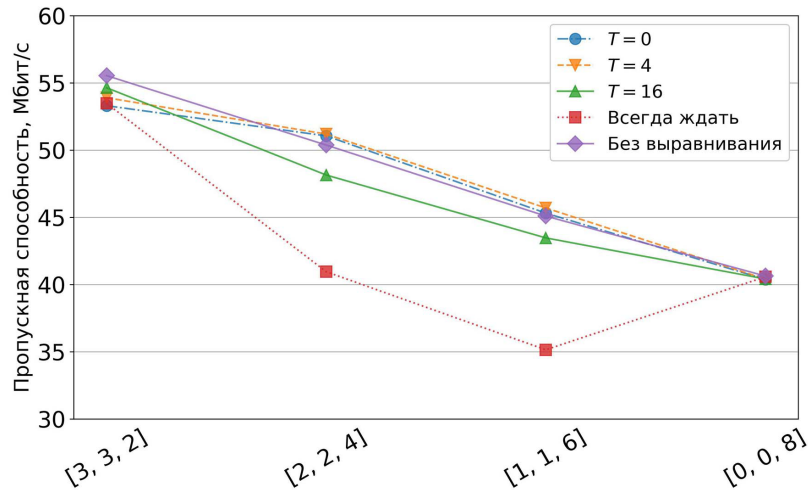
го, что следующий конкурентный период начнется в новом канале, высока. В таком случае достаточно переключения канала только после проигранного конкурентного периода, что соответствует алгоритму без возвращения. Для того чтобы проверить влияние распределения длин A-MPDU на разницу между производительностями, получающимися при использовании разных алгоритмов, рассмотрим случай с их большим разбросом. При распределении  $U[1, 64]$  длин A-MPDU разница между двумя рассматриваемыми алгоритмами увеличивается до 7%. Таким образом, вероятность обратного переключения канала становится выше из-за большего разброса в длинах передаваемых кадров. Далее в статье считается, что устройства MLSR используют алгоритм с возвращением.

Если же не использовать механизм RTS/CTS, то проигрыш в случае  $X = 0$  является более существенным, и может достигать 8% (см. рис. 7). В данном случае длительность коллизии равна максимальной длительности кадров, попавших в коллизию, что существенно больше, чем длительность RTS кадра. Таким образом, большее число коллизий в случае  $[0, 0, 2Y]$  в сравнении со случаем  $[Y, Y, 0]$  имеет существенное влияние на общую пропускную способность сети. По этой же причине и для других конфигураций общий выигрыш получается меньше, чем в случае с использованием RTS/CTS.

В остальной части все выводы, полученные при анализе случая с использованием механизма RTS/CTS, остаются верными и в случае без его использования.

### 3.3. Сравнение устройств MLSR и MLMR

До этого был рассмотрен сценарий с одинаковым числом одноканальных устройств в различных каналах  $N_1 = N_2$ . Рассмотрим прирост производительности устройств MLMR относительно устройств MLSR с использованием алгоритма с возвращением в асимметричном



**Рис. 9.** Пропускная способность устройств MSMR в режиме NSTR для различных схем доступа к каналу в случае  $N_1 + N_2 + N_3 = 8$ ;  $N_1 = N_2$ ; механизм RTS/CTS включен.

случае. Для этого сравним пропускные способности многоканального устройства в сценарии с конфигурацией  $[N_1, N_2, 1]$ , где в одном случае многоканальное устройство работает в режиме MLSR с использованием алгоритма с возвращением, а в другом случае многоканальное устройство работает в режиме STR. Данный сценарий интересен тем, что показывает разницу в производительности различных типов многоканальных устройств на ранних стадиях их внедрения.

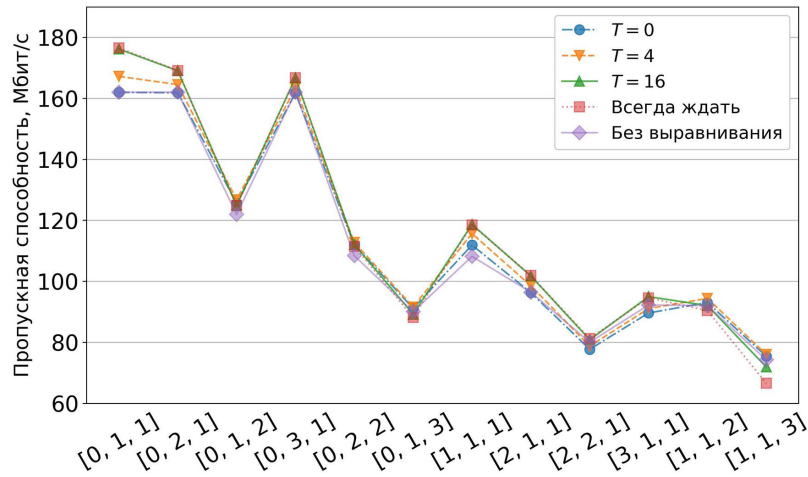
Для начала сравним производительность устройств MLMR в режиме NSTR и устройств MLSR. В рассматриваемом сценарии устройства MLMR, использующие схему доступа без выравнивания кадров и параметр  $T = 0$  (станция, связанная к многоканальным устройством, инициирует передачу сразу же, как только ее счетчик отсрочки истек), имеет прирост пропускной способности в пределах 5% по отношению к устройствам MLSR. Такая небольшая разница между ними объясняется тем, что данные режимы с точки зрения метода доступа к каналу имеют единственное ключевое различие — устройства MLSR не имеют возможности участвовать в конкурентном периоде одновременно в обоих каналах в случае, когда оба эти канала свободны.

Относительный выигрыш использования устройств MLMR в режиме STR по сравнению с устройствами MLSR показан на рис. 8. Наибольшая разница между ними наблюдается для малого числа станций. В частности, в случае  $N_1 = N_2 = 0$  устройство MLMR использует полностью оба канала, в то время как устройство MLSR занимает лишь один канал.

Общая тенденция такова, что при увеличении общего числа устройств в сети преимущество режима STR становится менее выраженным, поскольку устройства MLSR пропускают все меньшее число конкурентных периодов. Стоит отметить, что в случае  $N_1 = 0$  при  $N_2 \rightarrow \infty$  производительность MLMR устройств в режиме STR становится неотличимой от производительности устройств MLSR, поскольку устройства MLSR полностью занимают Канал 2, а доля ресурсов Канала 1, полученная устройствами STR, стремится к нулю при  $N_2 \rightarrow \infty$ .

#### 3.4. Сравнение производительности разных схем доступа в режиме NSTR

Сравнение производительности различных схем доступа к каналу в сценарии, при котором общее число пользовательских устройств в сети равно 8 ( $N_1 + N_2 + N_3 = 8$ ), при этом количество одноканальных устройств в различных каналах одинаково ( $N_1 = N_2$ ), показано на



**Рис. 10.** Пропускная способность устройств NSTR для различных схем доступа к каналу в случае  $N_1, N_2, N_3 \leq 3$ ;  $N_2, N_3 > 0$ ; механизм RTS/CTS включен.

рис. 9. Рассматриваются схемы с механизмом выравнивания кадров для  $T = 0, 4, 16, \infty$ . Кроме того, рассматривается схема доступа без выравнивания кадров при  $T = 0$ . Без выравнивания кадров конкурентные периоды в разных каналах пересекаются гораздо реже, поэтому различия между схемами доступа с разными параметрами  $T$  в этом случае малы, и пропускная способность между ними отличается не более, чем на 1%. В связи с этим на рис. 9 показана пропускная способность только для случая  $T = 0$  для случая с использованием механизма выравнивания кадров.

В данном сценарии в целом пропускная способность получается тем меньше, чем выше значение  $T$ . Это связано в том, что при увеличении параметра  $T$  у одноканальных устройств повышается вероятность выигрыша в соревновании за эфир. При использовании механизма выравнивания кадров количество пересекающихся по времени конкурентных периодов возрастает, однако при слишком большом значении  $T$  многоканальное устройство рискует не выиграть соревнование за доступ к каналу ни в одном канале. В случае  $[0, 0, 8]$  все устройства в сети являются многоканальными, а потому все каналные ресурсы распределяются между ними и разница в производительности между различными схемами доступа выходит незначительной. В случаях  $[2, 2, 4]$  и  $[1, 1, 6]$  доля многоканальных устройств среди всех устройств велика, поэтому они часто используют механизм выравнивания. Однако также в сети присутствуют и одноканальные устройства, которые получают больший шанс выиграть соревнование за доступ к каналу сразу после выравнивания. В результате пропускная способность многоканального устройства для схемы с выравниванием и  $T = \infty$  в этих случаях получается до 23% ниже по сравнению с  $T = 0$  и схемы без выравнивания.

Далее, на рис. 10 показана пропускная способность для все тех же схем, описанных выше, но для сценария, в котором  $N_1, N_2, N_3 \leq 4$ ;  $N_3 > 0$ . В отличие от предыдущего сценария, где схема с выравниванием и  $T = \infty$  показывала наименьшую пропускную способность, здесь эта схема во многих случаях наоборот показывает большую пропускную способность. В частности, при  $N_3 = 1$  эта схема позволяет достичь наибольшей производительности, что объясняется следующим.

Рассмотрим ситуацию, при которой оба канала свободны и происходит одновременный отсчет счетчиков отсрочки многоканальным устройством. Пусть один из счетчиков истек и многоканальное устройство, не дожидаясь истечения второго счетчика, инициирует успешную передачу в одном канале. Тогда в случае  $N_3 = 1$  соревнование за доступ к другому каналу

обязательно выиграет какое-то одноканальное устройство. Если  $N_3 > 1$ , т.е. ненулевая вероятность, что другой канал выиграет одна из оставшихся  $N_3 - 1$  многоканальных устройств. В силу симметричности между различными многоканальными устройствами их пропускная способность примерно одинакова за долгий промежуток времени, поэтому максимизация пропускной способности одного многоканального устройства эквивалентна максимизации суммарной пропускной способности всех многоканальных устройств. Таким образом, в случае  $N_3 > 1$  инициирование передачи в одном канале (т.е. без ожидания счетчика, соответствующего другому каналу) не имеет такого же большого негативного влияния на вероятность выиграть соревнование за доступ к другому каналу в рамках текущего конкурентного периода, как в случае  $N_3 = 1$ .

Таким образом, схема с ожиданием для  $T = \infty$  позволяет существенно повысить пропускную способность при  $N_3 = 1$ , особенно для конфигураций  $[0, 1, 1]$  и  $[1, 1, 1]$ , т.е. в тех, где имеется наименьшее количество устройств в сети, а, значит, и конкуренции в соревновании за доступ к каналу. В этих двух случаях наблюдается повышение производительности на 9...10% по сравнению со схемой без выравнивания.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многоканальная передача является одним из главных нововведений в Wi-Fi 7, которое позволиткратно увеличить пропускную способность и уменьшить временные задержки. Однако многоканальные устройства могут иметь ряд ограничений, такие как невозможность одновременных приема и передача сигнала в различных каналах.

В данной работе реализованы режимы многоканальной работы MLSR и MLMR в имитационной модели на основе NS-3, что позволило сравнить их эффективность между собой. В работе также предложены алгоритмы переключения активного канала для устройств MLSR, которые позволили повысить пропускную способность этих устройств до 70% по сравнению с одноканальными устройствами.

Также показано, что устройства MLMR в режиме NSTR в рассмотренных сценариях показывают лишь небольшой прирост по производительности (до 5%) по сравнению с устройствами MLSR. Рассмотрены и сравнены различные схемы доступа при использовании режима NSTR. Получено, что использование ожидания счетчика одного канала другим счетчиком может привести к существенному повышению пропускной способности (до 9...10%) при наличии лишь одного многоканального устройства в сети. В противном случае производительность устройства может упасть.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Khorov, I. Levitsky, I. F. Akyildiz, "Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7," in IEEE Access, vol. 8, pp. 88664-88688, 2020
2. IEEE P802.11be D2.1.1 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 8: Enhancements for extremely high throughput (EHT).
3. D. Bankov, A. Didenko, E. Khorov, V. Loginov and A. Lyakhov, "IEEE 802.11ax uplink scheduler to minimize delay: A classic problem with new constraints," 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292382.
4. K. Huang et al., "Mutli-Link Channel Access Schemes for IEEE 802.11be Extremely High Throughput," in IEEE Communications Standards Magazine, vol. 6, no. 3, pp. 46-51, September 2022, doi: 10.1109/MCOMSTD.0001.2100084.

5. E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, G. Bianchi, "A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs," in *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, Firstquarter 2019.
6. I. Levitsky, Y. Okatev and E. Khorov, "Study on Simultaneous Transmission and Reception on Multiple Links in IEEE 802.11be networks," 2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T), 2020, pp. 1–4, doi: 10.1109/EnT50437.2020.9431275.
7. 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," in *IEEE ICC 2021*, 2021, pp. 1–6.
8. T. Song and T. Kim, "Performance Analysis of Synchronous Multi- Radio Multi-Link MAC Protocols in IEEE 802.11be Extremely High Throughput WLANs," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 1, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/1/317>
9. N. Korolev, I. Levitsky and E. Khorov, "Analytical Model of Multi-link Operation in Saturated Heterogeneous Wi-Fi 7 Networks," in *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, doi: 10.1109/LWC.2022.3207946.
10. 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*, 2022
11. M. Park, et al, "Enhanced Multi-Link Single Radio Operation", Doc: IEEE 802.11-20/0562r7, July 2020
12. Y. Li, et al, "Discussion of NSTR and EMLSR", Doc: IEEE 802.11-22/0349r2, March 2022
13. I. Tinnirello and G. Bianchi, "Rethinking the IEEE 802.11e EDCA Performance Modeling Methodology," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 18, no. 2, pp. 540–553, April 2010, doi: 10.1109/TNET.2009.2029101
14. G. F. Riley and T. R. Henderson, "The ns-3 network simulator." pp. 15–34, 2010. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/books/collections/Wehrle2010.htmlRileyH10>

## Performance Evaluation of Multi-Link Single-Radio and Multi-Radio Devices in Heterogeneous Wi-Fi 7 Networks

N.Y. Korolev, I.A. Levitsky, E.M. Khorov

The IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) standard for WLANs, which is currently under development, will allow for a multiple throughput increase and lower latency in comparison with the previous IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) standard. One of the main novelties of IEEE 802.11be to achieve this is the native support for the multi-link feature, and this can be done using single or multiple radio interfaces. When using one radio interface, the device can quickly switch it from a busy channel to a free one and consequently reduce the channel access delay. However, transmission can only be performed in one channel. The usage of multiple radio interfaces allows for simultaneous data transmission on multiple channels, but the radio interfaces can interfere with each other, so the standard describes an operation mode for the mitigation of such interference. In this multiple channels operation mode, one performs either joint synchronized transmission or joint synchronized signal reception. The article describes algorithms for switching a single radio interface of a multi-link device, which allow to increase its throughput. It also compares the performance of multi-link devices with one and several radio interfaces.

**KEYWORDS:** IEEE 802.11be, Wi-Fi 7, multiple channel access, multi-link single-radio (MLSR) device, multi-link multi-radio (MLMR) device, heterogeneous network.