

Адаптивная агрегация данных для многоканальных устройств Wi-Fi 7 с произвольным числом неидеальных каналов¹

А. К. Дылько, В. Д. Парошин, И. А. Левицкий, В. А. Логинов

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва
Поступила в редколлегию 29.11.2025 г. Принята 12.12.2025 г.

Аннотация—С целью удовлетворения растущих требований к беспроводным сетям стандарт IEEE 802.11be вводит технологию многоканальной передачи, позволяющей устройствам одновременно принимать и передавать данные в нескольких частотных каналах. Многоканальные устройства (англ.: Multi-Link Devices, MLD) для отслеживания статуса доставки множества пакетов используют единое для всех каналов скользящее окно. Оно имеет конечный размер, поэтому числа пакетов, передаваемых MLD одновременно в разных каналах, взаимосвязаны. Потери пакетов приводят к дополнительному уменьшению количества пакетов, доступных для передачи в скользящем окне, а также размеров передач и пропускной способности. В данной работе впервые для MLD с произвольным числом каналов предлагается асинхронный алгоритм выбора размеров передач данных, учитывающий потери в каналах и конечный размер скользящего окна. При помощи имитационного моделирования эффективность предложенного алгоритма исследована в широком наборе сценариев. Показано, что предложенный алгоритм позволяет увеличить пропускную способность до 12% в сценарии точка-точка по сравнению со статическими алгоритмами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Wi-Fi 7, 802.11be, многоканальная передача, алгоритм агрегации.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_4_725

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология беспроводных локальных сетей Wi-Fi получила широкое распространение благодаря дешевизне и простоте развертывания. Приложения, такие как стриминг в 4K/8K качестве, приложения расширенной реальности (Extended Reality, XR), ставят перед сетями новые вызовы. Для обслуживания этих приложений требуется обеспечить низкие задержки, высокую пропускную способность и надежность [1, 2]. С этой целью в новом стандарте IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) ввели множество новых технологий, таких как метод доступа к каналу с вытеснением [4], механизм пробуждения по расписанию с ограниченным резервированием [3] и технология многоканальной передачи (англ.: multi-link operation, MLO) [5]. MLO позволяет многоканальным устройствам (англ.: Multi-Link Device, MLD) одновременно принимать и передавать данные в нескольких частотных каналах, тем самым значительно повышая пропускную способность.

MLD состоят из нескольких логических станций, каждая из которых независимо осуществляет передачу данных через соответствующий ей радиоинтерфейс. В случае когда интерференция между каналами отсутствует, MLD работают в режиме одновременного приема и передачи данных (англ.: Simultaneous Transmit and Receive, STR). При этом начала передач в

¹ Исследование осуществлено в рамках Госзадания № FFNU-2025-0035 ИППИ РАН

каналах могут быть сдвинуты друг относительно друга, то есть осуществляются *асинхронные* передачи. Если межканальная интерференция присутствует, то MLD не могут прослушивать один канал во время передачи в другом канале, так как передающий канал заглушит сигнал, принимаемый в первом канале. Соответственно, в этом случае MLD работают в режиме без поддержки одновременного приема и передачи данных (англ.: Non-Simultaneous Transmit and Receive, NSTR). В этом режиме MLD либо одновременно во всех каналах прослушивают среду, либо одновременно во всех каналах ведут передачу.

С целью уменьшения накладных расходов, MLD могут агрегировать множество MPDU (англ.: MAC Protocol Data Unit — блок данных протокола подуровня доступа к каналу) в единый кадр A-MPDU (англ.: Aggregated MAC Protocol Data Unit). MLD-приемник после декодирования A-MPDU отвечает в том же канале кадром блочного подтверждения (англ.: BlockAck, BACK), содержащим битовую маску, указывающую на успешно принятые MPDU. Количество MPDU, содержащихся в A-MPDU, будем называть размером агрегации. Алгоритм, определяющий размер каждого A-MPDU, будем называть алгоритмом агрегации (AA). Стандарт IEEE 802.11be не определяет AA.

Для работы механизма агрегации MPDU необходимо одновременно отслеживать статус доставки множества MPDU и упорядочивать их передачу на сетевой уровень. Для этого используется скользящее окно (англ.: BlockAck Window, BAW). Всем MPDU присваиваются порядковые номер (англ.: Sequence Number, SN), по которым приемник восстанавливает их порядок. Устройство передает только те MPDU, SN которых лежит внутри BAW. Границы BAW задаются SN головного MPDU в очереди и размером W — максимальным количеством MPDU в BAW. Подтвержденные MPDU покидают BAW в порядке возрастания SN, после чего BAW заполняется MPDU с большими SN. Далее данный процесс будем называть *продвижением* BAW.

MPDU из BAW могут быть подтвержденными, неподтвержденными и передаваемыми. *Передаваемые* MPDU агрегированы для передачи, но BACK, указывающий на статус их доставки не был получен. *Подтвержденные* MPDU отправлены и был получен BACK, подтверждающий их успешную доставку. *Неподтвержденные* MPDU либо еще не были агрегированы, либо были отправлены, но был принят BACK, указывающий на их потерю.

В случае MLO для передачи MPDU одной категории доступа используется единое для всех каналов BAW. Из-за конечного размера BAW, если агрегировать слишком большое количество MPDU в одном канале, то в других каналах окажется мало доступных для передачи MPDU или их не будет вовсе. Это приведет к уменьшению размеров агрегаций и падению пропускной способности. В случае с потерями размеры агрегации ещё больше падают из-за блокирования продвижения окна потерянными MPDU [6]. В дальнейшем будем называть *блокировками* BAW все ситуации, в которых MPDU остаются в BAW после подтверждения.

Многие работы, например [8, 9], исследуют влияние AA на задержки при обслуживании XR-трафика. Однако в данных работах влияние AA на пропускную способность не исследовано. В других работах рассматриваются AA для NSTR MLD, осуществляющие синхронные передачи [10–12]. В то же время в статьях [6, 7] показано, что для STR MLD, на которых сфокусировано текущее исследование, наибольшую эффективность демонстрируют *асинхронные* AA, приводящие к асинхронным передачам. В [6] предложен AA, повышающий пропускную способность STR MLD в случае с потерями, но только для двух каналов. В работе [7] показано, что в случае $n > 2$ каналов при асинхронной передаче данных упорядоченная доставка MPDU нарушается, что приводит к блокировкам BAW и уменьшению количества MPDU, доступных для передачи, даже в отсутствие потерь. При этом в случае двух каналов блокировок BAW в отсутствие потерь не наблюдается. Чтобы учесть эти особенности MLD с произвольным числом каналов в [7] предложен новый AA FIFO, поддерживающий только сценарий с каналами

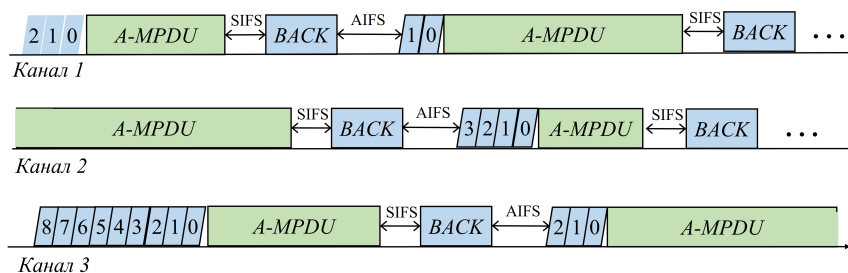


Рис. 1. Передача данных MLD по трем каналам

без потерь пакетов. В данной работе предлагается новый АА FIFO-EXT, который является расширением АА FIFO на случай с потерями MPDU.

У данной работы следующий научный вклад.

1. Впервые предлагается асинхронный АА FIFO-EXT, поддерживающий MLO с произвольным числом каналов в сценарии с потерями.
2. Показано, что АА FIFO-EXT увеличивает пропускную способность по сравнению со статическим АА в разнообразных сценариях: от 2 до 4 каналов в широком диапазоне номинальных скоростей с различными соотношениями между ними.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приведено описание сценария, построение алгоритма, описана эвристика учета потерь. В разделе 3 приведены численные результаты имитационного моделирования. В разделе 4 подведены итоги проделанной работы.

2. АЛГОРИТМ АГРЕГАЦИИ FIFO-EXT

В данном разделе описан предлагаемый в работе АА FIFO-EXT для следующего сценария. Рассматривается сеть Wi-Fi конфигурации точка-точка, состоящая из двух MLD, работающих в n частотных каналах по методу доступа EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access). MLD используют каналы с произвольными сигнально-кодowymi конструкциями со скоростями r_i и вероятностями потерь MPDU p_i , трафик насыщенный, а межканальная интерференция отсутствует. Так что MLD поддерживают STR MLO. На рис. 1 изображена передача данных в описанном сценарии при трех каналах. В каждом из трех каналов передаются A-MPDU, подтверждаемые по окончании кадрами BACK. Затем, через межкадровый интервал AIFS после приема BACK, MLD начинает вновь конкурировать за доступ к среде, выполняя процедуру отсчета обратной отсрочки в том же канале. По окончании этой процедуры начинается новая передача A-MPDU.

Далее в подразделе 2.1 описывается аналитическая модель для исследуемого сценария и работа АА FIFO-EXT при отсутствии потерь. В этом случае АА FIFO-EXT сводится к АА FIFO из [7]. В подразделе 2.2 описана эвристика, используемая в АА FIFO-EXT для учета потерь.

2.1. Аналитическая модель. FIFO-EXT в случае без потерь

Аналогично [6], процесс передачи данных рассматривается как циклическая последовательность фаз полезной нагрузки и фаз накладных расходов. Фаза накладных расходов включает в себя преамбулу, заголовок физического уровня A-MPDU, отсрочку, межкадровые интервалы и блочное подтверждение. Циклом называется фаза полезной нагрузки с идущей за ней

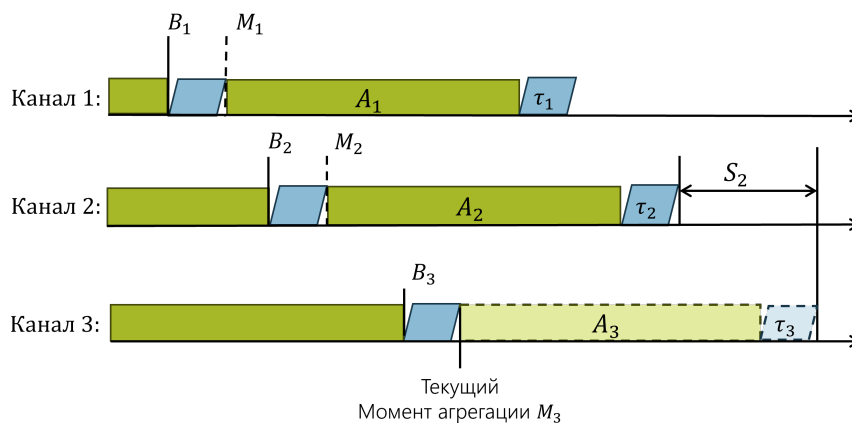


Рис. 2. Выбор размера агрегации в соответствии с рассчитанным сдвигом

фазой накладных расходов. В модели рассматривается случай, когда длительность каждого цикла равна между всеми каналами, а накладные расходы имеют постоянную длительность. На рисунке 2 фаза полезной нагрузки обозначена прямоугольниками, фаза накладных расходов — более короткими параллелограммами. На рисунке 2 также показаны моменты времени M_i и B_i , где M_i — момент начала передачи в канале i , B_i — момент получения BASK в канале i . Символом A_i обозначен размер агрегации в канале i , символом τ_i обозначена длительность накладных расходов в канале i . Также на рисунке изображен промежуток времени S_i — сдвиг между началами передач в каналах i и $(i + 1)$.

Пусть в момент M_i MLD начинает новую передачу в канале i и выбирает размер агрегации для A-MPDU. По рисунку 3 видно, что: $\frac{A_i}{r_i} = \sum_{k=1}^n S_k - \tau_i$. Таким образом, сдвиги определяют размер агрегации. Соответственно, чтобы определить размер агрегации, вычисляются сдвиги по системе неравенств, введенной в [7]:

$$\begin{cases} A_1 + (S_1 + \tau_1 - \tau_2)r_2 + \sum_{l=3}^n A_l \leq W, \\ \dots, \\ A_i + (S_i + \tau_i - \tau_{i+1})r_{i+1} + \sum_{l=1}^{i-1} A_l + \sum_{l=i+2}^n A_l \leq W, \\ \dots, \\ A_n + (S_n + \tau_n - \tau_1)r_1 + \sum_{l=2}^{n-1} A_l \leq W, \end{cases} \quad (1)$$

где нумерация каналов идет в порядке очередности передач, $i = 1, 2, \dots, n$. Неизвестными в системе неравенств являются размеры агрегации A_i и сдвиги S_i . Известными величинами являются номинальные скорости r_1, r_2, \dots, r_n , длительности накладных расходов: $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$.

Увеличение средних размеров агрегаций позволяет увеличить долю времени, когда канал занят полезной нагрузкой. Поэтому при расчете сдвигов по (1) ищется такое решение, которое максимизирует суммарный размер агрегации.

MLD выбирает такой размер агрегации, чтобы временной промежуток между началами передач в канале i и канале $(i - 1)$ был равен рассчитанному сдвигу S_{i-1} . Заметим, что в случае без потерь такая последовательность действий приведет к тому, что в каждом канале будут совершаться передачи A-MPDU с размерами агрегации, соответствующие решению (1).

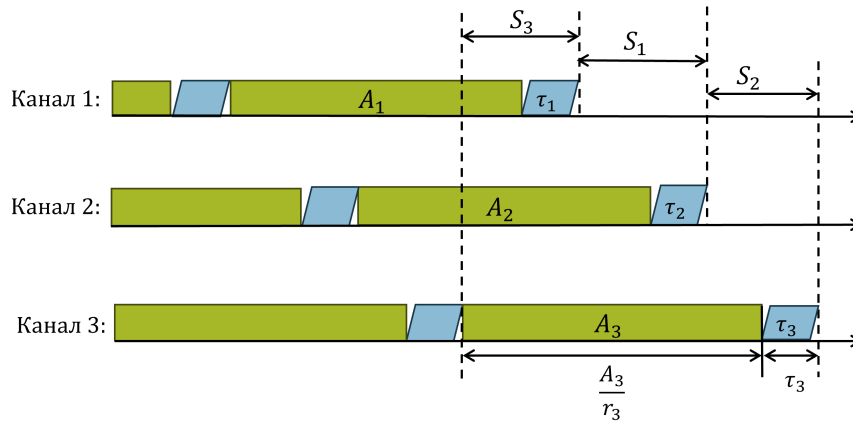


Рис. 3. Связь размеров агрегации и сдвигов

Для поиска решения (1) используется метод линейного программирования. Данный метод находит такое решение, которое максимизирует целевую функцию переменных. В качестве такой функции выбирается суммарный размер агрегации. С учетом того, что: $\frac{A_i}{r_i} = \sum_{k=1}^n S_k - \tau_i$, суммарный размер агрегации записывается следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n A_i = \left(\sum_{i=1}^n r_i \right) \sum_{k=1}^n S_k - \sum_{i=1}^n r_i \tau_i. \quad (2)$$

Из (2) видно, что как размеры агрегаций, так и целевая функция зависят не от отдельных значений сдвигов, а от суммарного размера сдвигов. Это приводит к тому, что порядок сдвигов в решении задачи линейного программирования может меняться. Таким образом возникает проблема выбора одного из множества оптимальных решений. В случае одинаковых каналов в силу симметрии такое решение одно. В случае без потерь достаточно один раз решить задачу линейного программирования и выбрать любое решение, поскольку в дальнейшем процессе передачи данных выбранные сдвиги будут сохраняться. В [7] применяется этот принцип и проблема выбора одного из множества решений не возникает.

В случае с потерями задача линейного программирования решается каждый раз, когда начинается передача. Если при этом всегда выбирать решение произвольно, то, как показано в разделе 3, пропускная способность значительно уменьшается. Чтобы ввести однозначное соответствие между номером сдвига и номером канала, сдвиги упорядочиваются по убыванию величины, каналы упорядочиваются по убыванию номинальной скорости. Сопоставление упорядоченных списков распределяет сдвиги по каналам.

2.2. Эвристика для учета потерь

Теперь рассмотрим работу АА FIFO-EXT в случае потерь. Чтобы учесть потери, в (1) подставляется эффективный размер BAW w , меньший, чем фактический размер BAW W . С уменьшением w уменьшаются размеры агрегаций, определяемые решением (1), то есть MLD будет агрегировать меньше MPDU. Тогда, даже при наличии потерь BAW будет блокироваться гораздо реже, размеры агрегации в среднем вырастут, а пропускная способность увеличится в сравнении с подстановкой W в (1).

В момент M_i предлагается вычислять w как:

$$w = \mu(W - advance_{max} + E(advance)), \quad (3)$$

где $advance_{max}$ — максимальное возможное продвижение BAW в момент получения следующего BASK, $advance$ — продвижение BAW в момент получения следующего BASK в B_{i+1} (может быть меньше $advance_{max}$ вследствие потерь), $E(advance)$ — математическое ожидание продвижения BAW в B_{i+1} , а μ — безразмерный коэффициент, определяющий консервативность алгоритма. Чем меньше μ , тем меньше выбираемые размеры агрегаций и вероятность оставить для последующих передач слишком мало неподтвержденных MPDU. При расчете всех вышеописанных величин AA FIFO-EXT использует среднюю длительность отсрочки. $E(advance)$ рассчитывается по аналогии с [6]. Сначала оценивается какие MPDU будут доставлены до отправки следующего кадра BASK в B_{i+1} . Затем, используя известную вероятность потери MPDU в каждом канале, оценивается математическое ожидание продвижения BAW в момент получения этого кадра BASK по формулам, приведенным в [6].

Заметим, что если $\mu = 1$ и потерь нет, то алгоритм совпадает с AA FIFO из [7], так как все пакеты успешно подтверждаются и, соответственно, $E(advance) = advance_{max}$. В случае потерь при получении BASK $advance$ может отличаться от $E(advance)$ в большую или меньшую сторону. Это приводит к двум типам отклонений. Если $advance$ окажется меньше $E(advance)$, это может в момент M_{i+1} привести к *нехватке* MPDU — случаю, когда в BAW оказывается меньше неподтвержденных пакетов, чем предписывает агрегировать AA. При этом размер A-MPDU уменьшится и выбранные AA сдвиги не будут достигнуты, в результате чего нарушится система сдвигов, что в дальнейшем уменьшит доступные размеры агрегаций во всех каналах. Если в момент M_{i+1} $advance$ окажется больше $E(advance)$, это будет значить, что произошел *недобор* — в момент M_i можно было агрегировать большее количество MPDU, не вызывая этим нехватку MPDU в момент M_{i+1} . Чтобы учесть неравнозначность влияния этих отклонений введен коэффициент μ , позволяющий балансировать частоту возникновения отклонений первого и второго типа. Заметим, что случаи нехватки MPDU приводят к нарушению хода алгоритма, поэтому с целью повышения надежности алгоритма необходимо минимизировать вероятность нехватки MPDU.

3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенный AA был протестирован при помощи имитационного моделирования в NS-3. Параметры имитационного моделирования отображены в таблице 1. В таблице 2 выписаны рассматриваемые соотношения номинальных скоростей каналов в исследуемых сценариях. В них r является переменной величиной, определяющей абсолютное значение номинальных скоростей.

Таблица 1. Параметры имитационного моделирования

Длительность SIFS	16 мкс
Длительность слота отсрочки, σ	9 мкс
Длительность AIFS, мкс	43 мкс
CW_{min}	15
Длительность кадра BASK, τ_{ack}	88 мкс
Длительность преамбулы и заголовка физ. уровня, τ_{phy}	52 мкс
Число антенн	2, 4, 8
Ширина полосы канала	40, 80, 160 МГц
Диапазон индексов СКК	3 – 11
W	1024

Таблица 2. Исследуемые сценарии

Число каналов	Номинальные скорости
2	r, r
2	$2r, r/2$
3	r, r, r
3	$2r, r, r/2$
4	r, r, r, r
4	$2r, r, r, r/2$

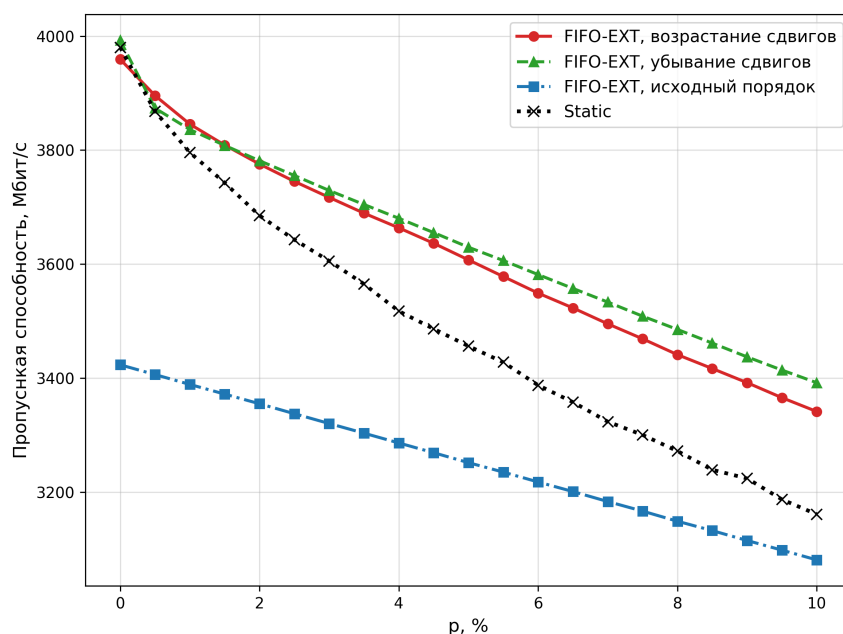
Для всех сценариев вероятности потери MPDU во всех каналах равны, а в качестве базового алгоритма выбран алгоритм Static, выбирающий размеры агрегации пропорционально номинальным скоростям частотных каналов:

$$A_i = \frac{r_i}{\sum_{k=1}^n r_k} W. \quad (4)$$

3.1. Влияние выбора одного из множества решений на пропускную способность

Как было сказано в подразделе 2.1, задача линейного программирования может иметь несколько решений, каждое из которых определяет разный порядок сдвигов. Чтобы продемонстрировать влияние этого эффекта на пропускную способность, рассмотрим случай с $n = 4$ каналами с номинальными скоростями $2r, r, r, r/2$, где $r = 1$ Гбит/с. Для этого сценария на рисунке 4 приведена зависимость пропускной способности от p для трех случаев алгоритма FIFO-EXT: нумерация сдвигов никаким образом не меняется; сдвиги нумеруются по возрастанию; сдвиги нумеруются по убыванию. При этом во всех случаях каналы нумеруются по убыванию номинальной скорости.

По рисунку видно, что если не менять исходный порядок, то пропускная способность в случае FIFO-EXT меньше чем в случае Static. Это связано с тем, что при каждой передаче

Рис. 4. Зависимость пропускной способности от p для разных нумераций сдвигов

FIFO-EXT случайно выбирает одно из решений, что приводит к быстрому изменению сдвигов и размеров агрегаций, то есть процесс передачи данных не соответствует ни одному из решений. Выбор порядка увеличивает пропускную способность до 16% и позволяет FIFO-EXT преодолеть Static по пропускной способности. При этом выбор лучшего порядка увеличивает пропускную способность не более чем на 2%.

3.2. Влияние μ на пропускную способность

Далее рассмотрим влияние выбора μ на пропускную способность. Для этого рассмотрим сценарий $n = 3$ каналов с одинаковыми номинальными скоростями $r = 1$ Гбит/с. На рис. 5 приведена зависимость пропускной способности от вероятности потери MPDU в каналах p для разных значений μ . При малых значениях p выбор $\mu < 1$ не приводит к увеличению пропускной способности, так как влияние потерь незначительно и практически не замедляет продвижение BAW, поэтому дополнительного уменьшения размеров агрегации не требуется. Поэтому в этом случае наилучшим образом работает аналитическое решение, достигаемое при $\mu = 1$. В таком случае при отсутствии потерь эффективный размер BAW w совпадает с полным размером BAW W : $w = W = 1024$. Однако, с ростом p прирост пропускной способности относительно $\mu = 1$ составляет до 4%. Максимум пропускной способности в среднем по всем p достигается при $\mu = 0,8$. Это демонстрирует, что при высоких потерях эвристикой с $\mu = 1$ выбираются слишком большие размеры агрегации, что увеличивает число блокировок BAW и уменьшает размеры передач в среднем.

3.3. Пропускная способность FIFO-EXT в различных сценариях

Представляет интерес найти диапазон r , в котором FIFO-EXT позволяет увеличить пропускную способность. Для этого положим $\mu = 1$ и протестируем FIFO-EXT во всех сценариях, представленных в таблице 2. На рисунках 6–11 приведена зависимость пропускной способности FIFO-EXT и Static при разных p от абсолютных значений номинальных скоростей, определяемых r . Во всех сценариях FIFO-EXT превосходит Static по пропускной способности.

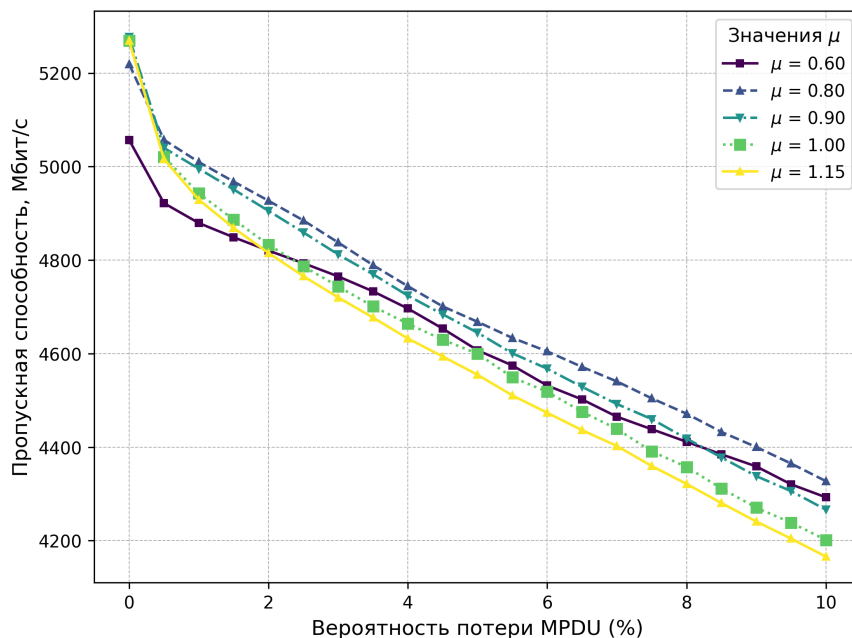


Рис. 5. Зависимость пропускной способности от p для разных μ

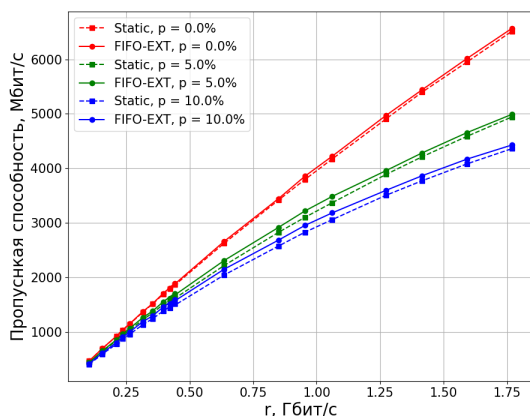
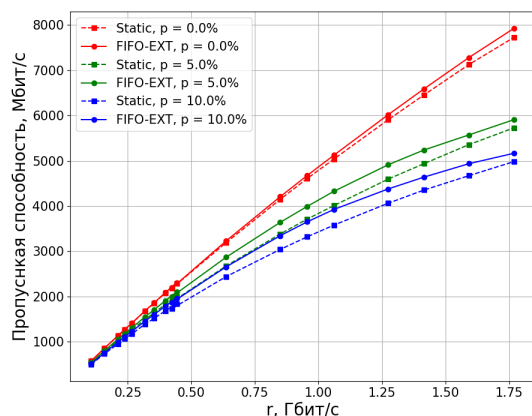

 Рис. 6. $n = 2$ канала, номинальные скорости: r, r

 Рис. 7. $n = 2$ канала, номинальные скорости: $2r, r/2$

Таблица 3. Прирост пропускной способности

Сценарий	$p = 0\%$	$p = 5\%$	$p = 10\%$
2 канала, одинаковые номинальные скорости	1.3%	3.8%	4.1%
2 канала, разные номинальные скорости	2.6%	6.9%	9.7%
3 канала, одинаковые номинальные скорости	3.1%	10.1%	10.4%
3 канала, разные номинальные скорости	2.0%	11.4%	11.9%
4 канала, одинаковые номинальные скорости	2.7%	12.0%	12.6%
4 канала, разные номинальные скорости	1.6%	11.1%	12.0%

При $p = 0$ различие между FIFO-EXT и Static невелико, поскольку размеры агрегаций, выбираемые алгоритмом Static, близки к аналитическому решению из [7]. При наличии потерь в каналах прирост пропускной способности увеличивается, поскольку Static не учитывает возможность блокировки BAW. FIFO-EXT учитывает состояние BAW, что позволяет увеличить пропускную способность относительно Static. В таблице 3 записан максимальный прирост пропускной способности FIFO-EXT относительно Static в каждом из сценариев.

По рисункам также видно, что при низкой номинальной скорости пропускная способность для обоих алгоритмов стремится к одному значению при всех p . Это связано с тем, что при низкой номинальной скорости для большой по времени передачи достаточно меньшего числа MPDU. В итоге максимальный размер агрегации ограничивается не состоянием BAW, а ограничением максимальной длительности одного A-MPDU, равной 5.421 мс по стандарту.

Рассмотрим теперь случай высоких скоростей. Из (1) следует, что чем выше номинальные скорости, тем строже неравенство, ограничивающее величину сдвигов. То есть с ростом номинальных скоростей значения сдвигов, а значит длительность циклов и размеры агрегации постепенно уменьшаются до некоторого минимума. AA Static же всегда выбирает фиксированные размеры агрегаций, что объясняет сближение Static и FIFO-EXT по пропускной способности при высокой номинальной скорости. Это явление наблюдается на рисунках 7, 9, 11 в правой части рисунков.

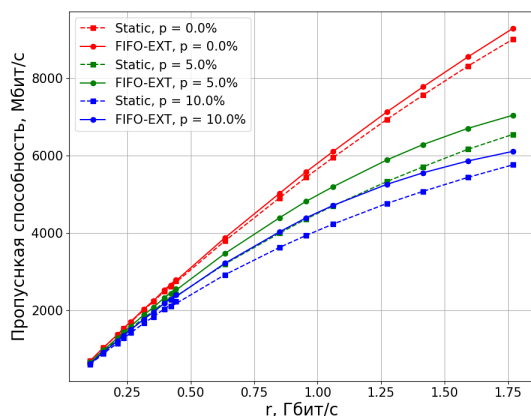


Рис. 8. $n = 3$ канала, номинальные скорости: r, r, r

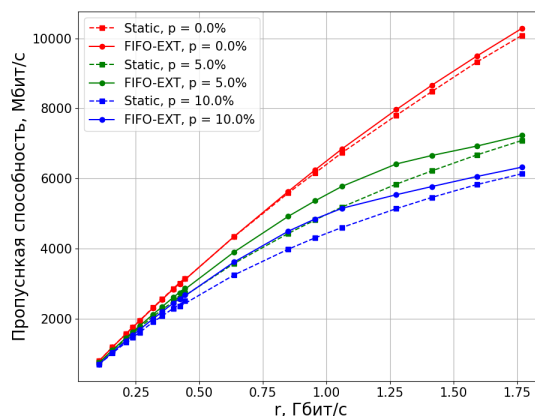


Рис. 9. $n = 3$ канала, номинальные скорости: $2r, r, r/2$

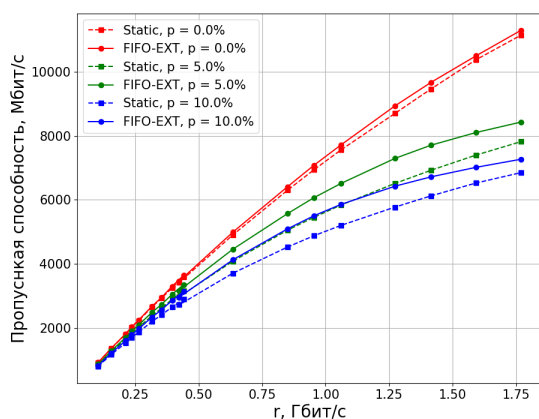


Рис. 10. $n = 4$ канала, номинальные скорости: r, r, r, r

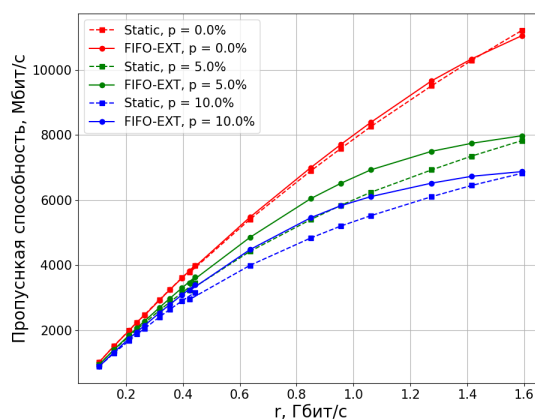


Рис. 11. $n = 4$ канала, номинальные скорости: $2r, r, r, r/2$

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе впервые разработан асинхронный АА, повышающий пропускную способность STR MLD в случае $n > 2$ каналов с потерями. При помощи имитационного моделирования показано, что в различных сценариях данный алгоритм обеспечивает прирост пропускной способности по сравнению с базовым алгоритмом Static. Максимальное значение прироста составляет до 12%. Пропускная способность предложенного алгоритма была исследована в широком наборе сценариев и с различными наборами внутренних параметров самого алгоритма. Также в данной работе найдена и исследована проблема выбора одного из множества решений задачи оптимизации для FIFO-EXT.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karamyshev A. et al. A Tutorial on Wi-Fi 8: The Journey to Ultra High Reliability //Problems of Information Transmission. – 2025. – Т. 61. – №. 2. – С. 164-210.
2. Karamyshev A. Y., Porai E. D., Khorov E. M. Closed-Form Approximations for the URLLC Capacity Using Queues //Problems of Information Transmission. – 2024. – Т. 60. – №. 3. – С. 255-272.

3. Bankov D. V. et al. Performance Evaluation of Wi-Fi 7 Networks with Restricted Target Wake Time //Problems of Information Transmission. – 2024. – Т. 60. – №. 3. – С. 233-254.
4. Riterman A. V. et al. Modeling of Preemptive Channel Access in Wi-Fi Networks //Problems of Information Transmission. – 2024. – Т. 60. – №. 4. – С. 327-343.
5. López-Raventós A., Bellalta B. Multi-link operation in IEEE 802.11 be WLANs //IEEE Wireless Communications. – 2022. – Т. 29. – №. 4. – С. 94-100.
6. Paroshin V., Levitsky I., Loginov V., Khorov E. Aggregation Algorithm to Increase Throughput of Multi-link Wi-Fi 7 Devices //IEEE Wireless Communications Letters. – 2024. – Vol. 13, no. 12. – pp. 3484-3487.
7. Парошин В.Д. Разработка и анализ алгоритмов агрегации пакетов при использовании многоканального доступа в сетях Wi-Fi 7: магистерская диссертация. — Москва, 2025. — 54 с.
8. Alsakati M. et al. Performance of 802.11 be Wi-Fi 7 with multi-link operation on AR applications //2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – IEEE, 2023. – С. 1-6.
9. López-Raventós Á., Bellalta B. Dynamic traffic allocation in IEEE 802.11 be multi-link WLANs //IEEE Wireless Communications Letters. – 2022. – Т. 11. – №. 7. – С. 1404-1408.
10. Medda D., Iossifides A., Chatzimisios P. TXOP Time Balancing with MPDU Aggregation in IEEE 802.11 be Multi-Link Networks //IEEE Communications Letters. – 2025.
11. Wu J., Fang X., Min G. Deep Reinforcement Learning based Multi-link Frame Aggregation Length Optimization in Next Generation Wi-Fi Networks //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2024.
12. Zhu L., Gu L., Chen R. A retransmission scheme in IEEE 802.11 be synchronized multi-link WLANs //IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. – 2023. – Т. 106. – №. 5. – С. 871-875.

Adaptive Data Aggregation for Wi-Fi 7 Multi-Link Devices with an Arbitrary Number of Non-Ideal Links

A. K. Dylko, V. D. Paroshin, I. A. Levitsky, V. A. Loginov

To meet the increasing demands of wireless networks, the IEEE 802.11be standard introduces support for Multi-Link Operation (MLO) that enables devices to transmit and receive data simultaneously over several channels. To track the delivery status of multiple packets, MLDs employ a unified sliding window shared across all links. Due to its finite size, the numbers of packets transmitted by an MLD concurrently over different links are interdependent. Under lossy conditions, the number of packets available for transmission within the sliding window additionally reduces, leading to smaller transmission sizes and throughput degradation. We propose the first asynchronous algorithm that selects transmission size of MLDs with an arbitrary number of the links. This algorithm accounts for channel losses and the finite sliding window size. Through simulation, the performance of the proposed algorithm is evaluated across a wide range of scenarios. It is shown that the proposed algorithm increases throughput by up to 12% in a point-to-point scenario compared to static algorithms.

KEYWORDS: Wi-Fi 7, 802.11be, Multi-Link Operation, aggregation algorithm.