

Дублирование пакетов для повышения пропускной способности многоканальных устройств в сетях Wi-Fi 7

В.Д. Парошин^{1,2}, И.А. Левицкий¹, В.А. Логинов^{1,3}, Е.М. Хоров¹

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

^{**} Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

^{***} Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Поступила в редколлегию 01.12.2023. Принята 20.12.2023

Аннотация—Многоканальная передача является одним из основных нововведений стандарта IEEE 802.11be. Ее особенностью является совместное использование во всех каналах устройством единого скользящего окна, служащего для контроля передачи пакетов. Ввиду конечности скользящего окна, передача пакетов на одном канале может привести к нехватке пакетов на других каналах, ведущей к уменьшению общей пропускной способности. Чтобы этого избежать, требуется алгоритм, выбирающий количество пакетов для отправки и их номера. В данной работе предлагается расширение известных алгоритмов отправки дублирующих пакетов. С помощью имитационного моделирования подтверждено, что дубликаты позволяют увеличить пропускную способность многоканальных устройств за счет ускорения продвижения скользящего окна.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многоканальная передача, Wi-Fi 7, IEEE 802.11be, дубликаты, NS-3, BlockAck.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_4_624

1. ВВЕДЕНИЕ

Для удовлетворения растущих требований к производительности сетей Wi-Fi разработчики стандарта IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) предложили технологию многоканальной передачи (англ.: Multi-Link Operation, MLO), позволяющую паре многоканальных устройств (англ.: Multi-Link Device, MLD) использовать для передачи и приема данных одновременно несколько каналов [1].

Согласно стандарту, при отсутствии мощной межканальной интерференции MLD может работать в режиме с одновременным приемом и передачей (англ.: Simultaneous Transmission and Reception, STR), при котором оно асинхронно и независимо осуществляет доступ к среде на каналах. В качестве основного метода доступа к среде используется механизм EDCA (англ.: Enhanced distributed channel access), реализующий случайный доступ с прослушиванием несущей.

Как и одноканальные устройства (англ.: Single-Link Device, SLD), MLD могут агрегировать и передать несколько пакетов в одном кадре, называемом A-MPDU (англ.: Aggregated MAC Protocol Data Unit), уменьшив накладные расходы на межкадровые интервалы и заголовки физического уровня.

Для обеспечения упорядоченной доставки данных при отправке A-MPDU пакеты последовательно пронумерованы. Также стандартом вводится скользящее окно BAW (англ.: BlockAck Window, BAW), определяемое размером W и порядковым номером $WinStart$ самого старого еще не подтвержденного и не отброшенного пакета. Чтобы избежать потерь, передаваться

могут только пакеты с порядковым номером в диапазоне от $WinStart$ до $WinStart + W - 1$ включительно. При этом при подтверждении кадром BACK (англ.: Block Acknowledgment) успешного декодирования головных пакетов в BAW или их отбрасывании вследствие истечения времени жизни следует продвигать BAW, увеличивая $WinStart$ до первого неподтвержденного пакета, время жизни которого еще не истекло.

Особенностью MLD является использование единого BAW для всех каналов. Из-за конечности BAW количество пакетов, которые MLD может агрегировать и отправить одновременно на всех каналах, ограничено [2]. Если это не учитывать при формировании A-MPDU, то часть каналов может получить слишком мало пакетов. Это приводит к уменьшению количества доступных для агрегирования пакетов и падению пропускной способности. В дальнейшем данный эффект будем называть *нехваткой пакетов*. Более того, если часть пакетов unsuccessfully декодирована, то количество пакетов, доступных для передачи внутри BAW, уменьшается [3–6], что усугубляет нехватку пакетов. В таком случае особенно важно использовать алгоритм агрегации (AA), выбирающий, какие пакеты MLD следует агрегировать и на каком канале.

Для борьбы с нехваткой пакетов могут быть использованы дубликаты. Дубликатом является пакет, передаваемый повторно до получения BACK на предыдущую копию этого пакета. Заметим, что один A-MPDU может содержать несколько копий одного пакета.

В литературе показано, что отправка дубликатов увеличивает надежность доставки заданного пакета и, несмотря на увеличение накладных расходов, может повысить пропускную способность MLD без STR [7, 8]. К сожалению, эти результаты не могут быть использованы для анализа влияния дубликатов на нехватку пакетов в случае STR MLD, так как методы доступа к среде для MLD с STR и без STR принципиально отличаются [9, 10]. Также авторы работы [11] показывают, что полное дублирование передач в дополнительном втором канале может значительно увеличить надежность и уменьшить задержки STR MLD по сравнению с SLD. Однако они не исследуют другие AA помимо полного дублирования и игнорируют влияние дубликатов на пропускную способность и нехватку пакетов. Авторы [12] предлагают вместо дубликатов для повышения надежности передач MLD использовать сетевое кодирование. Несмотря на то, что оно является перспективным методом для повышения надежности передач MLD, для его реализации требуются значительные изменения в стандарте.

В данной работе впервые предлагается для борьбы с нехваткой пакетов в случае STR MLD добавлять в A-MPDU дубликаты. Впервые показано, что дубликаты позволяют увеличить пропускную способность MLD за счет уменьшения нехватки пакетов.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 иллюстрируется проблема нехватки MPDU и описывается предлагаемый способ добавления дубликатов. В разделе 3 приведены результаты имитационного моделирования. Наконец, в разделе 4 подводятся итоги.

2. НЕХВАТКА ПАКЕТОВ И ДУБЛИКАТЫ

Базовым способом борьбы с нехваткой пакетов является использование AA, ограничивающего максимальное количество пакетов в одном A-MPDU до x . В дальнейшем количество пакетов, составляющих заданный A-MPDU, будем называть размером агрегации. Ограничение на размер агрегации означает, что если на момент начала передачи окно BAW содержит не менее x уникальных неотправленных и неподтвержденных пакетов, то MLD агрегирует и отправит ровно x пакетов. Иначе оно отправит все доступные пакеты. Аналогично работе [2], в данном исследовании будем использовать AA, ограничивающий размер агрегации до половины размера BAW $W/2$.

Рассмотрим более подробно действие механизма BAW при использовании выбранного AA. Для этого обратимся к примеру, изображенному на рис. 1. Здесь MLD с размером BAW $W = 4$ синхронно на двух каналах передает данные другому MLD, агрегируя по $W/2 = 2$ пакета на

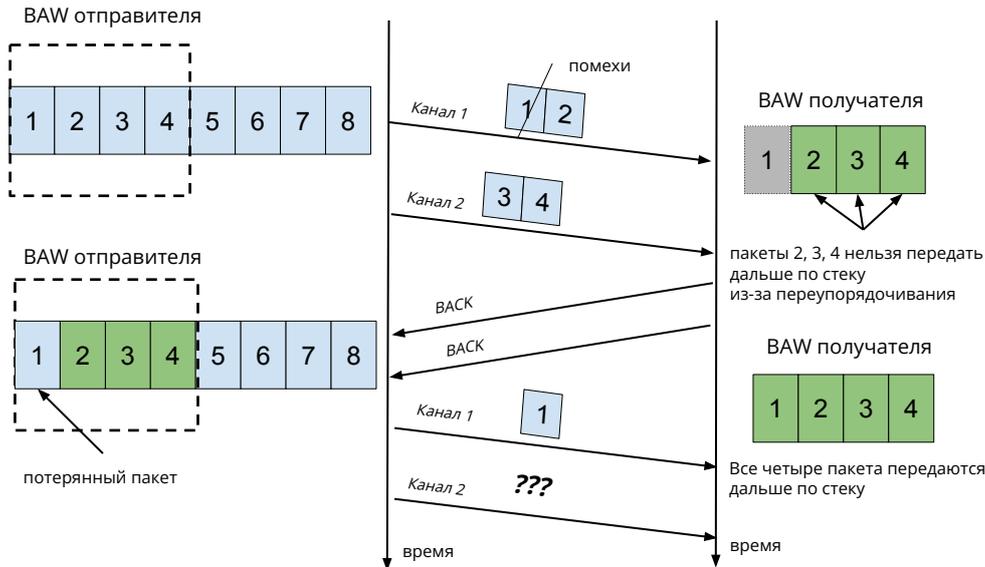


Рис. 1. Нехватка пакетов при ограниченном размере BAW в случае потерь.

каждом канале за раз. Пусть после первых передач на канале 1 потерян пакет с $SN = 1$. Тогда после приема отправителем кадров BAWK BAW не продвигается, а пакеты с $SN = \{2, 3, 4\}$ ожидают доставки пакета с $SN = 1$. На вторые передачи после приема кадров BAWK в BAW остается только один пакет с $SN = 1$, передаваемый на канале 1, поэтому канал 2 вынужденно простаивает. Таким образом, MLD-отправитель столкнулся с проблемой нехватки пакетов.

Использование дубликатов могло бы помочь в уменьшении нехватки пакетов. В данной работе предлагается следующий метод дублирования. Пусть в начало A-MPDU всегда помещается по одной копии каждого из первых n_1 неподтвержденных пакетов из начала BAW, если этот A-MPDU будет передаваться на канале 1, и n_2 , если он будет передаваться на канале 2. Тогда, в случае $n_1 = n_2 = 1$, первые передачи из приведенного выше примера содержат пакеты с $SN = \{1, 1, 2\}$ и $SN = \{1, 3, 4\}$ на каналах 1 и 2 соответственно, то есть пакет с $SN = 1$ отправляется в трех копиях. Благодаря этому он доставляется очень надежно и не теряется, поэтому BAW продвигается и ко вторым передачам содержит уже четыре пакета, готовых к передаче. Таким образом, добавление дубликатов в A-MPDU может ускорить продвижение окна при потерях пакетов. Разберем подробнее влияние описанного метода дублирования на пропускную способность в следующем разделе.

3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенный метод дублирования пакетов был реализован в среде имитационного моделирования NS-3. Рассматривается сеть из двух двухканальных MLD, одно из которых передает насыщенный поток данных другому MLD. Скорости передачи на каналах одинаковы, а доли потерянных пакетов (англ.: Packet Error Rate, PER) равны p_1 и p_2 соответственно. Размер BAW составляет 1024 — максимально возможный в стандарте IEEE 802.11be. Используется описанный ранее AA, ограничивающий размеры агрегации до 512 пакетов. Основные параметры экспериментов приведены в таблице 1.

На рис. 2 изображены зависимости пропускной способности MLD от количества дубликатов n_2 на канале 2 при заданном количестве дубликатов n_1 на канале 1. Случай с PER на канале 2 $p_2 \leq 0,01$ представлен на рис. 2а. Заметно, что дубликаты на втором канале только уменьшают

Таблица 1. Параметры эксперимента

Длительность SIFS	16 мкс
Длительность слота отсрочки, σ	9 мкс
Размер BAW, W	1024
Длительность AIFS	43 мкс
CWmin	15
Номинальные скорости	8166 Мбит/с

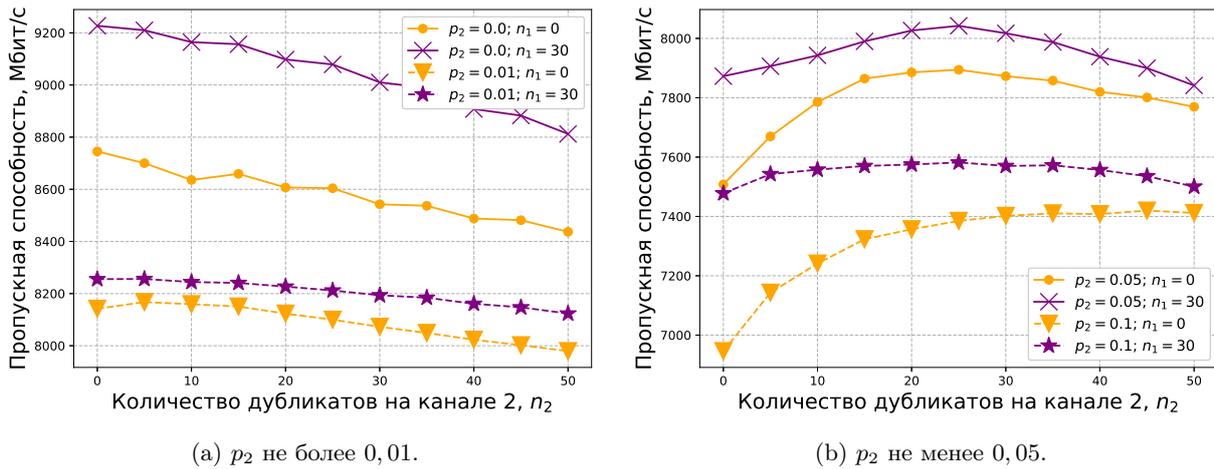


Рис. 2. Зависимость пропускной способности от количества дубликатов на канале 2, n_2 . PER на канале 1 равна $p_1 = 0,05$.

пропускную способность MLD в этом случае. Это происходит из-за того, что пакеты на канале 2 доставляются достаточно надежно даже без дублирования. А использование дубликатов приводит только к росту накладных расходов и к падению пропускной способности.

На первом канале, где PER выше и равна $p_1 = 0,05$, дубликаты позволяют увеличить пропускную способность. Максимальный выигрыш достигается при наибольшей $p_2 = 0,1$, как на рис. 2b. В этом сценарии наибольшие потери пакетов, а прирост пропускной способности составляет 9%. Таким образом, дубликаты наиболее востребованы в сценариях с большими PER, где острее встает проблема нехватки пакетов.

На рис. 2b заметно, что пропускная способность в каждом сценарии с заданными p_1, p_2, n_1 имеет экстремум или полку пропускной способности по количеству дубликатов на втором канале n_2 . Это связано с тем, что при небольших n_2 дублируются пакеты из начала BAW, неуспешно переданные во время предыдущих попыток. Успешная доставка этих головных пакетов позволяет вытеснить из окна не только их самих, но и множество соседних уже подтвержденных пакетов, что значительно ускоряет продвижение BAW. Однако при дальнейшем увеличении n_2 чаще начинают дублироваться далекие от начала BAW пакеты, не окруженные уже подтвержденными пакетами. Передача таких пакетов приводит к вытеснению из BAW только их самих, поэтому ускорение продвижения BAW за счет описанного эффекта прекращается. Таким образом, дублирование далеких от начала BAW пакетов скорее приводит к росту накладных расходов, чем к ускорению продвижения BAW и уменьшению нехватки пакетов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

STR MLO является перспективной технологией, способной улучшить производительность сетей Wi-Fi 7. Однако пропускная способность MLD может быть снижена из-за проблемы нехватки пакетов. Данная проблема возникает из-за того, что MLD использует единое окно BAW для всех каналов, имеющее конечный размер и ограничивающее количество одновременно доступных для передачи пакетов. Проблема усугубляется при наличии потерь пакетов, замедляющих продвижение BAW.

В данной работе впервые показано, что дублирование пакетов позволяет повысить размеры агрегации и пропускную способность в сценариях с потерями пакетов благодаря повышению надежности передачи головных пакетов в BAW.

В рамках дальнейших исследований могут быть изучены динамические методы добавления дубликатов, учитывающие количество потерь пакетов. Также могут быть исследованы динамические АА, предлагающие гибкие ограничения на размеры агрегации совместно с динамическим дублированием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Khorov, I. Levitsky, and I. F. Akyildiz, "Current status and directions of IEEE 802.11be, the future Wi-Fi 7," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 88664–88688, 2020.
2. V. Paroshin and A. Krotov, "Исследование многоканальных методов доступа Wi-Fi 7 с использованием NS-3," *Сборник трудов ИТУС*, 2022.
3. S. Shinnazar, C. Jin-Ghoo, and Y.-T. Kim, "Enhanced Mathematical Modeling of Aggregation-Enabled WLANs with Compressed BlockACK," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 18, pp. 1260 – 1273, jun 2019.
4. I. Muhammad and R. Bhaskaran, "802.11ac Frame Aggregation is Bottlenecked: Revisiting the Block ACK," *MSWIM '19: Proceedings of the 22nd International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, p. 45–49, nov 2019.
5. F. Klinger, F. Dressler, and C. Sommer, "The Impact of Head of Line Blocking in Highly Dynamic WLANs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, pp. 7664 – 7676, may 2018.
6. P. Bhagwat, P. Bhattacharya, A. Krishna, and S. Tripathi, "Enhancing throughput over wireless LANs using channel state dependent packet scheduling," *Proceedings of IEEE INFOCOM '96. Conference on Computer Communications*, mar 1996.
7. R. C. Linjie ZHU, Liang GU, "A retransmission scheme in IEEE 802.11be synchronized multi-link WLANs," *J-STAGE*, nov 2022.
8. T. Jin, J. Guo, L. Lin, Y. Wang, and Y. Chen, "Advanced AI Technologies for Industrial Internet of Things Applications," *Hindawi*, sep 2022.
9. 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. PP, pp. 1–1, 01 2022.
10. N. Korolev, I. Levitsky, and E. Khorov, "Analyses of NSTR Multi-Link Operation in the Presence of Legacy Devices in an IEEE 802.11 be Network," in *2021 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pp. 94–98, 2021.
11. G. Lacalle, I. Val, O. Seijo, M. Mendicute, D. Cavalcanti, and J. Perez-Ramirez, "Analysis of Latency and Reliability Improvement with Multi-Link Operation over 802.11," in *2021 IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pp. 1–7, 2021.
12. W. Mao, O. Seijo, M. Park, and H. Nikopour, "Network Coding for Ultra-Reliable Wi-Fi: An Experimental Study," pp. 1–8, 09 2023.

Packet Duplication for Improving Throughput of the Multi-Link Devices in Wi-Fi 7 Networks

V.D. Paroshin, I.A. Levitsky, V.A. Loginov, E.M. Khorov

Multi-link operation is one of the main innovations of the upcoming IEEE 802.11be standard. MLO uses a common sliding window for all links to control the delivery of packets. Due to the finiteness of the sliding window, transmission of packets on one link may result in packet shortages on other links, reducing throughput. To avoid it, an aggregation algorithm is required that selects the number and packets to be transmitted. In this paper, the known algorithms are extended by sending duplicates. Simulations acknowledged that duplicates can increase the MLD throughput by accelerating the sliding window progression.

KEYWORDS: Multi-link, Wi-Fi 7, IEEE 802.11be, duplicates, NS-3, BlockAck.