

# Захват канала в сетях Wi-Fi при использовании механизма пропуска подканалов<sup>1</sup>

А. А. Третьяков<sup>\*,\*\*</sup>, И. А. Левицкий<sup>\*</sup>, Е. М. Хоров<sup>\*</sup>

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

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

Поступила в редколлегию 01.07.2025 г. Принята 25.07.2025 г.

**Аннотация**—В плотных сетях Wi-Fi использование широких каналов, позволяющеекратно увеличить пропускную способность, затрудняется из-за наличия узкополосных помех. Для более эффективной работы в таких условиях в стандарте Wi-Fi 7 используется механизм пропуска подканалов. Он позволяет устройствам гибко выбирать используемые частотные ресурсы, пропуская части канала и избегая узкополосной интерференции. В данной работе проведено исследование применения механизма пропуска подканалов и обнаружен эффект захвата канала, возникающий в случае наличия в соседних сетях передач с разной шириной канала. Этот эффект ограничивает максимальную доступную ширину полосы сети до минимальной ширины передач в ней и существенно снижает справедливость распределения частотных ресурсов между соседними сетями. В результате среднее геометрическое пропускных способностей двух сетей Wi-Fi может падать более чем на 30% по сравнению с ситуацией, где в обеих сетях используются только передачи с максимальной шириной канала.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** IEEE 802.11be, Wi-Fi 7, агрегация каналов, пропуск подканалов, узкополосная интерференция, захват канала.

**DOI:** 10.53921/18195822\_2025\_25\_2\_175

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Технология Wi-Fi является популярным способом беспроводного подключения для большинства пользователей дома, на работе и в общественных местах. Такая широкая популярность во многом объясняется ее работой в нелицензируемом диапазоне частот, в котором оборудование можно эксплуатировать без получения индивидуальных разрешений, что резко снижает стоимость его развертывания. Однако многочисленные сети Wi-Fi (англ.: BSS, Basic Service Set) вынуждены делить между собой ограниченные частотные ресурсы. Непрерывно возрастающее число и плотность размещения устройств Wi-Fi затрудняет достижение высоких скоростей передачи данных для всех пользователей.

Объединение каналов (англ.: channel bonding) в сетях Wi-Fi для увеличения ширины канала осуществляется последовательно в строго определенном порядке. В гетерогенных сценариях, где устройства разных поколений осуществляют передачи с различной шириной полосы, узкополосные передачи одних устройств могут блокировать значительную часть канала для остальных [1]. В таких условиях обеспечение справедливого и стабильного распределения ресурсов становится серьезной проблемой [2].

Для решения этой проблемы в стандарте IEEE 802.11ax [3] (Wi-Fi 6) для многопользовательских передач предлагается механизм выбора ширины канала с возможностью пропуска

<sup>1</sup> Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00756

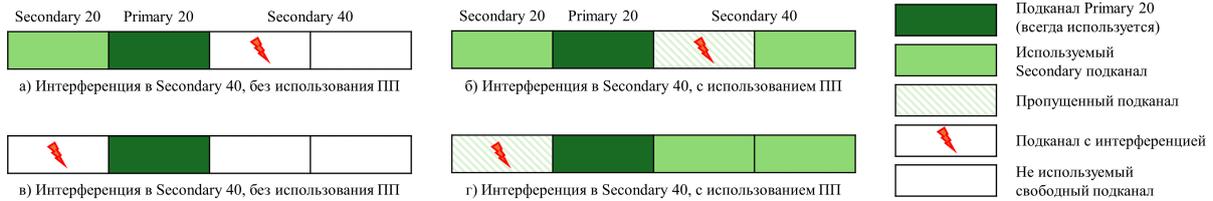


Рис. 1. Пример работы пропуска подканалов.

подканалов (англ.: preamble puncturing, далее механизм пропуска подканалов, ПП). ПП позволяет передающему устройству Wi-Fi не использовать часть подканалов, обходя таким образом интерференцию. Это существенно повышает пропускную способность при наличии узкополосных помех. В стандарте IEEE 802.11be [4] (Wi-Fi 7) ПП был расширен для использования в 320 МГц каналах, а также в однопользовательских передачах.

При использовании механизма ПП устройство Wi-Fi должно использовать некоторый алгоритм выбора ширины канала с возможностью пропуска подканалов (далее алгоритм ПП) для определения используемых при передаче частей канала. Наивный алгоритм, заключающийся в выборе максимально возможного числа подканалов, неэффективен и несправедлив. заключающаяся в выборе максимально возможного числа подканалов, неэффективна и несправедлива. Неэффективность выражается в том, что скорость передачи данных в широком канале может оказаться ниже, чем в более узком. Это происходит, если подканалы, в которых можно передавать согласно правилам CCA (англ.: Clear Channel Assessment), имеют различный уровень помех. Передатчик применяет одну и ту же сигнально-кодую конструкцию (СКК) во всех задействованных подканалах, и наличие помех даже в одном из них снижает скорость передачи данных. Как показано в работе [1], оптимизация алгоритма ПП позволяет повысить пропускную способность до двух раз по сравнению с наивным алгоритмом ПП.

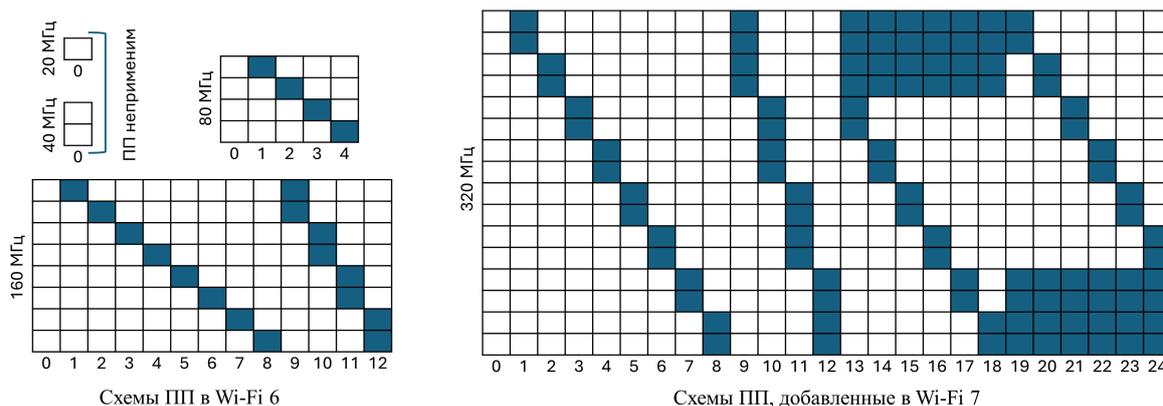
Несправедливость проявляется в гетерогенных сценариях, где устройства поддерживают разную ширину канала. Такие гетерогенные сценарии особенно актуальны, поскольку реальные сети Wi-Fi обычно содержат устройства различных поколений с разными возможностями. В данной работе выявлен и проанализирован эффект *захвата канала*. В случае двух гетерогенных сетей эффект заключается в использовании одной сетью практически всех частотных ресурсов, существенно ограничивая максимальную доступную ширину канала в другой сети.

С помощью имитационного моделирования проводится анализ захвата канала с целью оценки его влияния на справедливость распределения ресурсов в современных сетях Wi-Fi. В качестве метрики, отражающей как эффективность использования спектра, так и справедливость распределения ресурсов, используется среднее геометрическое пропускных способностей двух сетей Wi-Fi, одна из которых содержит устройства с различной поддерживаемой шириной полосы.

Работа построена следующим образом. В разделе 2 описан механизм пропуска подканалов, а также проведен обзор литературы. В разделе 3 рассматривается эффект захвата канала. В разделе 4 приведены рассматриваемые сценарии, а также представлены численные результаты. В разделе 5 приводится заключение.

## 2. МЕХАНИЗМ ПРОПУСКА ПОДКАНАЛОВ

Одним из ключевых механизмов для увеличения пропускной способности в сетях Wi-Fi является объединение каналов. Механизм был впервые добавлен в стандарте IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) и расширялся в дальнейшем вместе с максимальной доступной шириной полосы. Все каналы Wi-Fi в составе канала большей ширины называются его подканалами. Подканалы



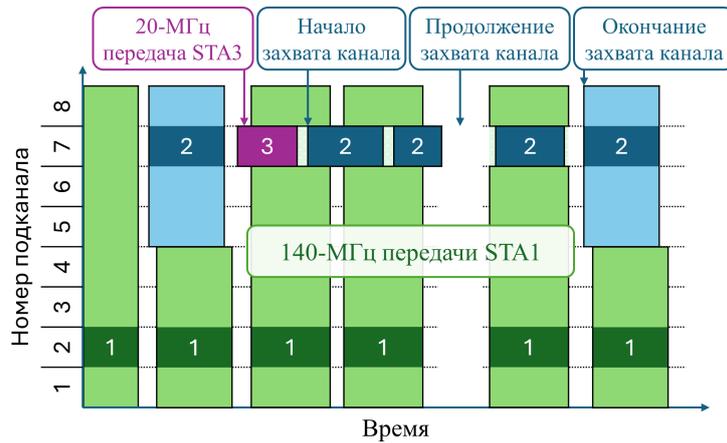
**Рис. 2.** Схемы ПП для однопользовательских передач. Пропущенные подканалы обозначены синим.

делятся на основные (англ.: primary)  $X$  и вторичные (англ.: secondary)  $X$ , где  $X$  — ширина подканала в МГц. В процессе объединения сначала добавляются primary, потом secondary определенной ширины. Объединяться могут только целиком свободные подканалы в строгом порядке от меньшей ширины к большей.

Механизм объединения каналов в стандартах IEEE 802.11n/ac не позволяет устройствам использовать все частотные ресурсы в условиях узкополосных помех. Это ограничение проиллюстрировано на рис. 1. В данном сценарии сеть Wi-Fi поддерживает ширину канала 80 МГц, однако в одном из 20 МГц подканалов присутствует интерференция. Согласно стандарту, интерференция в подканале secondary 40 (рис. 1а) позволяет 80 МГц устройству использовать только подканал primary 40 (объединение primary 20 и secondary 20), из-за чего остается неиспользованным свободный 20 МГц подканал. Аналогично, интерференция в secondary 20 МГц (рис. 1в) оставляет возможность использовать только primary 20, что составляет лишь одну треть от свободных ресурсов.

ПП позволяет обойти это ограничение. На рис. 1б и 1г видно, что при использовании ПП, устройство, поддерживающее ширину канала 80 МГц, может задействовать все свободные подканалы суммарной шириной 60 МГц. Набор схем пропуска подканалов, доступных в стандартах IEEE 802.11ax/be изображен на рис. 2, где каждый прямоугольник обозначает подканал шириной 20 МГц. При этом не допускается использовать схемы, в которых пропущен подканал Primary 20. Согласно правилам ССА, задействовать разрешается только те подканалы, где уровень интерференции ниже  $-62$  дБм, а также не обнаружены сигналы Wi-Fi мощностью выше  $-82$  дБм. В рассматриваемом на рис. 1 примере применяются схемы 2 и 4 для 80 МГц.

Пропуск подканалов рассматривается во множестве исследований. В работах [5,6] подробно изложены принципы работы ПП в Wi-Fi 6 и Wi-Fi 7, однако в них отсутствует анализ конкретных алгоритмов ПП и оценка прироста производительности. Предложения рабочей группы IEEE TGbe [7,8] содержат предварительную оценку потенциального прироста пропускной способности, но используют наивный алгоритм. В работе [9] предложена экспериментальная реализация ПП на физическом уровне для однопользовательских передач Wi-Fi 7, основанная на совместном LDPC-кодировании во всех подканалах. Потери производительности в связи с отсутствием полезного сигнала, но присутствием шума, в пропущенных подканалах, оцениваются как уменьшение эквивалентного соотношения сигнал-шум (англ.: signal-to-noise ratio, SNR) не более чем на 2 дБ для 320 МГц передач. По утверждению авторов предложенная схема имеет наиболее простую реализацию и обеспечивает лучшую производительность среди рассматриваемых альтернатив.



**Рис. 3.** Диаграмма использования частотно-временных ресурсов при применении ПП в гетерогенном сценарии.

При разработке следующего поколения Wi-Fi 8 (стандарт IEEE 802.11bn) обсуждается несколько улучшений ПП. В предложении [10] описывается структура поднесущих для пропуска подканалов, недоступных из-за интерференции, при использовании распределенных ресурсных блоков (англ.: distributed resource units, DRU). Механизм DRU позволяет повысить мощность каждой поднесущей за счет их менее плотного распределения для улучшения SNR и расширения зоны покрытия, оставаясь в рамках ограничений по спектральной плотности излучаемой мощности. В предложении [11] рассматривается механизм доступа к каналу NPCA (англ.: non-primary channel access), позволяющий получать доступ к secondary подканалам в случае, если primary 20 занят. В этом случае в свободных каналах выбираются новые primary и secondary подканалы. Авторы описывают расширение ПП, позволяющее использовать различные схемы в случае NPCA и стандартного доступа к каналу. Суть механизма остается той же, изменяется лишь подканал primary 20.

В работе [12] исследованы алгоритмы динамического объединения каналов в сетях Wi-Fi 6 с использованием сетей Маркова с непрерывным временем (англ.: continuous-time Markov networks, CTMN). Показано, что стратегия постоянного выбора максимально широкой доступной полосы может приводить к захвату ресурсов в отдельных сетях, и что не существует политики, оптимальной для всех сценариев. На основе рассмотренных политик в работе [1] было разработано и исследовано несколько алгоритмов пропуска подканалов. Предложенный алгоритм *Max Throughput* (MT) позволяет повысить пропускную способность до двух раз в однородных сценариях, когда все устройства в BSS поддерживают одинаковую ширину полосы. Однако MT, подобно наивному алгоритму, постоянно использует весь доступный канал, если в нем нет помех, что и порождает описанный эффект *захвата канала*.

### 3. ЭФФЕКТ ЗАХВАТА КАНАЛА

Опишем эффект захвата канала на примере с двумя сетями Wi-Fi: BSS1 и BSS2. В каждой BSS есть по одной точке доступа (англ.: access point, AP), AP1 и AP2, соответственно. BSS1 также содержит одну станцию (англ.: station, STA), STA1, поддерживающую ширину канала до 160 МГц, как и AP1. В BSS2 находятся две станции: STA2, как и AP2 поддерживающая ширину канала до 80 МГц (подканалы 5-8), и STA3, поддерживающая только 20 МГц (подканал 7). ПП поддерживается только в BSS1. Любая интерференция, кроме как от самих устройств Wi-Fi, отсутствует. Все устройства используют одинаковую СКК вне зависимости от ширины канала, чтобы изолировать влияние эффекта захвата канала. На рис. 3 показана

временная диаграмма использования частотных ресурсов в этом сценарии для случая, когда в BSS1 применяется наивный алгоритм ПП. Подканалы primary 20 номер 2 и 7 в BSS1 и BSS2 соответственно выделены цветом, а цифрой отмечен номер передающей станции.

Если передают только STA1 и STA2 и они создают достаточно сильную интерференцию друг другу, то они поделят канал поровну: после начала передачи STA2 с использованием 80 МГц STA1 займет оставшиеся 80 МГц. Иногда STA1 будет передавать используя все 160 МГц, но это не является существенной проблемой.

Захват канала возникает, когда STA3 начинает передачу только в primary 20. В это время STA1 может начать свою длительную передачу с суммарной шириной канала 140 МГц. Если же после окончания передачи STA3, но до окончания передачи STA1, начнет передачу STA2, то для нее останется свободным только тот же primary 20. Таким образом, подканалы 4, 5 и 7 будут захвачены STA1, и STA2 сможет использовать только ширину канала в четыре раза меньше максимальной поддерживаемой. В результате мгновенная пропускная способность STA2 снижается в четыре раза. Такой захват может сохраняться в течение длительного времени, пока primary 80 в BSS2 не будет свободен в начале новой передачи STA2.

Аналогичная ситуация может возникнуть и в случае с двумя сетями, работающими в одном канале 160 МГц, но с разными primary 20. В этом случае снижение доступной полосы для STA2 будет восьмикратным. Устройства Wi-Fi 7 с поддержкой 320 МГц могут захватывать каналы одновременно нескольких сетей с узкополосными устройствами, поскольку способны пропускать не смежные подканалы в различных частях спектра (см. схемы 14-23 на рис.2). При этом узкополосные устройства не обязательно должны принадлежать к той же сети, что и устройства, захватывающие канал, достаточно совпадения их primary 20 подканалов. Также захват канал возникает вне зависимости от направления трафика, поскольку важна только занятость подканалов.

Отметим, что описанный эффект является разновидностью захвата ресурсов в беспроводных сетях. В работе [13] рассматриваются различные виды дефицита ресурсов (англ.: resource starvation) в Wi-Fi и предложена аналитическая модель для их выявления. В работах [14, 15] анализируется другой эффект, называемый дефицитом частотных ресурсов (англ.: bandwidth starvation) и возникающий при совместной работе Wi-Fi и сотовых сетей LTE в нелицензируемом спектре.

В работе [16] исследуется метод доступа ко множеству каналов в сотовых сетях New Radio Unlicensed (NR-U). Обнаружена проблема, приводящая к существенной неравномерности распределения ресурсов между сетями двух операторов в зависимости от выбора основных и вторичных каналов. Исходя из результатов предлагается улучшенный метод доступа, обеспечивающий равномерное распределение ресурсов и высокую суммарную пропускную способность. Данный метод не подходит для решения проблемы захвата канала в сетях Wi-Fi, поскольку не совместим с использованием ПП. В работах [17, 18] исследуется эффект скрытых станций в сетях Wi-Fi, который в некоторых случаях приводит к аналогичному значительному падению производительности одной сети в пользу другой.

В отличие от существующих исследований, в данной работе проводится детальный анализ применения ПП в сетях Wi-Fi в гетерогенных сценариях и описывается проблема честности распределения ресурсов. Целью работы является определение влияния захвата канала на производительность сетей по метрике среднего геометрического пропускных способностей гетерогенных сетей.

#### 4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе анализ применения ПП проводится с использованием платформы имитационного моделирования NS-3 [19]. В NS-3 моделируется работа двух сетей BSS1 и BSS2

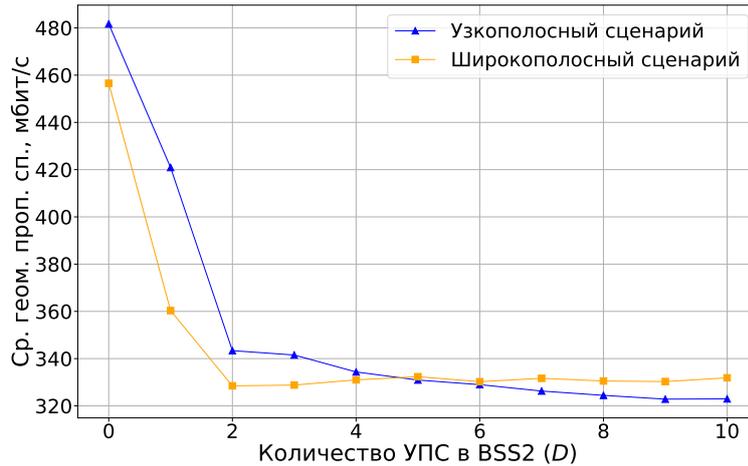


Рис. 4. Среднее геометрическое пропускных способностей в зависимости от количества устройств.

с точками доступа AP1 и AP2 соответственно. В каждой сети имеется по одной станции: STA1 и STA2. Все устройства могут передавать кадры с использованием наиболее скоростной СКК и максимальной ширины канала, для того чтобы при ее уменьшении увеличение порядка СКК не проводило к непропорциональному снижению пропускной способности. Потери кадров возможны только вследствие коллизий при одновременном использовании одних и тех же частотно-временных ресурсов.

AP1 и AP2 отправляют насыщенный трафик STA1 и STA2 соответственно. Длительность кадров составляет около 5 мс. Сеть BSS1 поддерживает канал до 160 МГц. Сеть BSS2 поддерживает канал до 80 МГц (подканалы 5-8) в узкополосном сценарии и до 160 МГц в широкополосном. Структура подканалов сетей совпадает с обозначениями на рис. 3.

AP2 также обслуживает  $D$  узкополосных станций (УПС), поддерживающих передачи только в 20 МГц (подканал 7). Эти станции имеют трафик, соответствующий фоновой сетевой активности ноутбука. Для моделирования были собраны 10000 пакетов фонового трафика на ноутбуке без активных пользовательских приложений. На основе полученных данных трафик был аппроксимирован пуассоновским процессом со средним интервалом между пакетами 94 мс и геометрическим распределением размера пакетов с минимальным значением 46 Б и средним 85 Б. Общая интенсивность трафика УПС изменяется вместе с их числом  $D$  для исследования ее влияния на захват канала.

Для оценки значимости эффекта захвата канала на рис. 4 строится график зависимости среднего геометрического пропускных способностей STA1 и STA2 от количества УПС  $D$  в двух рассматриваемых сценариях. Значение  $D = 0$  соответствует отсутствию УПС, 20 МГц передач в BSS2 и, следовательно, эффекта захвата канала.

В узкополосном сценарии присутствие одной УПС приводит к падению метрики на 12%. При увеличении числа  $D$  AP1 захватывает канал на все более продолжительное время и метрика убывает до 330 Мбит/с. При  $D \geq 4$  захват канала становится практически перманентным и метрика почти не меняется. Таким образом, снижение среднего геометрического пропускных способностей может составлять более 30%. Пропускные способности STA1 и STA2 в данном случае составляют примерно 830 Мбит/с и 130 Мбит/с, то есть отличаются более чем в 6 раз.

В широкополосном сценарии результаты аналогичны, при этом падение метрики при  $D = 1$  составляет еще более существенные 20%. Разница объясняется тем, что в первом сценарии AP1

захватывает канал реже. В узкополосном сценарии, когда AP2 начинает 80 МГц передачу, AP1 задействует оставшиеся 80 МГц, и эти передачи не синхронизированы по времени. В этом случае передача на УПС в BSS2 может проходить целиком в течение передачи BSS1, и AP1 не захватит весь оставшийся канал. В широкополосном сценарии передачи на STA1 и STA2 происходят с использованием всех 160 МГц. Поэтому AP1 всегда начинает свою 140 МГц передачу вскоре после начала передачи на УПС в BSS2, вызывая захват канала.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения высокого качества обслуживания в плотных Wi-Fi сетях механизм пропуск подканалов должен не только повышать пропускную способность, но и обеспечивать справедливое распределение частотных ресурсов. Однако некоторые алгоритмы выбора ширины канала с возможностью пропуска подканалов могут приводить к захвату канала, ограничивая ширину сети минимальной шириной передач в ней. Имитационное моделирование показывает, что даже редкие передачи узкополосных устройств вызывают долговременный захват канала, особенно в широкополосном сценарии, где одна узкополосная станция приводит к потере 20% по метрике среднего геометрического пропускных способностей, две и более — 30% и выше. Пропускные способности станций могут различаться более чем в шесть раз. Полученные результаты демонстрируют необходимость разработки новых алгоритмов для эффективного использования механизма пропуска подканалов в гетерогенных сценариях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levistky IA, Tretiakov AA, Khorov EM. Study of Bandwidth Selection Algorithm with Allowed Preamble Puncturing in IEEE 802.11 ax and IEEE 802.11 be Networks // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2022. — Vol. 67, no. 6. — P. 755–763.
2. Barrachina-Muñoz Sergio, Wilhelmi Francesc, Bellalta Boris. To overlap or not to overlap: Enabling channel bonding in high-density WLANs // Computer Networks. — 2019. — Vol. 152. — P. 40–53. — Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128618309745>.
3. A tutorial on IEEE 802.11 ax high efficiency WLANs / Khorov Evgeny, Kiryanov Anton, Lyakhov Andrey, and Bianchi Giuseppe // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2018. — Vol. 21, no. 1. — P. 197–216.
4. IEEE P802.11be/D2.2 Draft Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks— Specific requirements // IEEE P802.11be/D2.2, October 2022. — 2022. — October. — P. 1–923.
5. Khorov Evgeny, Levitsky Ilya, Akyildiz Ian F. Current status and directions of IEEE 802.11 be, the future Wi-Fi 7 // IEEE access. — 2020. — Vol. 8. — P. 88664–88688.
6. IEEE 802.11 ax: highly efficient WLANs for intelligent information infrastructure / Deng Der-Jiunn, Lin Ying-Pei, Yang Xun, Zhu Jun, Li Yun-Bo, Luo Jun, and Chen Kwang-Cheng // IEEE Communications Magazine. — 2017. — Vol. 55, no. 12. — P. 52–59.
7. Son J. et al. Preamble Puncturing and SIG-B Signaling // Doc: IEEE 802.11-19/1606r0. — 2019. — September.
8. Tian B., Yang L., Kim Y. Preamble Puncturing and RU Aggregation // Doc: 802.11-19/1869r2. — 2020. — January.
9. Dembele Hamidou, Chou Sih-Yu. Physical Layer Implementation Analysis of IEEE 802.11be Preamble Puncturing in SU Transmission. — Research Square, preprint. — 2024. — Accessed on: Jul. 01, 2025. Access mode: <https://www.researchsquare.com/article/rs-5319858/v1>.
10. Yan X. et al. Tone distribution in DRU with preamble puncturing - follow up // Doc: IEEE 802.11-24/1245r0. — 2024. — July.

11. Junbin C. et al. Preamble Puncturing during NPCA TXOP // Doc: IEEE 802.11-25/0675r0. — 2025. — July.
12. Barrachina-Muñoz Sergio, Wilhelmi Francesc, Bellalta Boris. Dynamic Channel Bonding in Spatially Distributed High-Density WLANs // IEEE Transactions on Mobile Computing. — 2020. — Vol. 19, no. 4. — P. 821–835.
13. Hua C., Zheng R. Starvation Modeling and Identification in Dense 802.11 Wireless Community Networks // IEEE INFOCOM 2008 - The 27th Conference on Computer Communications. — 2008. — P. 1022–1030.
14. Cano Cristina, Leith Douglas J. Coexistence of WiFi and LTE in unlicensed bands: A proportional fair allocation scheme // 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW). — 2015. — P. 2288–2293.
15. Ali Muntadher Alshaikh, Jamalipour Abbas. A novel spectrum allocation scheme for software-defined LTE-WiFi network // 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). — 2018. — P. 1–6.
16. Исследование многоканального метода доступа в сетях NR-U в сценариях совместного существования двух операторов / Логинов ВА, Троегубов АЮ, Ляхов АИ и Хоров ЕМ // Информационные процессы. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 141–154.
17. Vishnevskii VM, Gudilov AS, Lyakhov AI. Performance analysis of the broad-band wireless network with decentralized control and hidden terminals // Automation and Remote Control. — 2008. — Vol. 69, no. 10. — P. 1752–1764.
18. Hidden terminal management for uplink traffic in rate-controlled WiFi networks / Al-Bado Mustafa, Sengul Cigdem, Sreenan Cormac J, and Brown Kenneth N // 2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC) / IEEE. — 2016. — P. 1066–1071.
19. Network Simulator 3 (NS-3). — Accessed on: Jul. 01, 2025. Access mode: <https://www.nsnam.org/>.

## Bandwidth Starvation in Wi-Fi networks with allowed preamble puncturing

A. A. Tretiakov, I. A. Levitsky, E. M. Khorov

In dense Wi-Fi deployments, the use of wide channels, which can significantly increase throughput, often suffers by the presence of narrowband interference. To improve performance under such conditions, the Wi-Fi 7 standard uses preamble puncturing, a mechanism that allows devices to flexibly select frequency resources by omitting subchannels affected by interference. This paper investigates the practical use of preamble puncturing and reveals the bandwidth starvation effect, which occurs when neighboring networks operate with different bandwidths. This effect limits the maximum available bandwidth in a given network to the smallest bandwidth used by any transmission within it, significantly reducing the fairness of frequency resource allocation among overlapping networks. As a result, the geometric mean throughput of two neighboring Wi-Fi networks can drop by more than 30% compared to a scenario where both networks use only transmissions at maximum bandwidth.

**KEYWORDS:** IEEE 802.11be, Wi-Fi 7, channel bonding, preamble puncturing, narrowband interference, bandwidth starvation