



# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖКАНАЛЬНОЙ И ВНУТРИКАНАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ НА РАБОТУ СЕТИ WI-FI С ШИРИНОЙ КАНАЛА 40 МГц В ДИАПАЗОНЕ 2,4 ГГц

Я. А. Герасимова, А. В. Светова, Р. А. Дунайцев \*

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: roman.dunaytsev@spbgut.ru

**Аннотация**—Долгое время в сетях Wi-Fi использовались каналы исключительно шириной 22 МГц (IEEE 802.11b) и 20 МГц (IEEE 802.11a/g). С ратификацией IEEE 802.11n появилась возможность объединения двух каналов в один шириной 40 МГц, что позволяет при прочих равных условиях увеличить скорость передачи кадров примерно в 2 раза. Расположенные по соседству сети Wi-Fi, использующие каналы шириной 40 МГц и каналы шириной 20 МГц, могут за счет межканальной и внутриканальной интерференции негативно влиять друг на друга. **Предмет исследования.** В статье представлены результаты экспериментального исследования параллельной работы сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц и сети Wi-Fi с шириной канала 20 МГц в диапазоне 2,4 ГГц. **Метод.** В работе использовались следующие методы эмпирического исследования: измерение и эксперимент. **Основные результаты.** С помощью испытательного стенда была смоделирована параллельная работа сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц и сети Wi-Fi с шириной канала 20 МГц в диапазоне 2,4 ГГц. На основе перехваченного трафика был произведен расчет средней скорости передачи кадров и доли повторных передач в одной и другой сети Wi-Fi. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при ручном или автоматическом выборе беспроводных настроек Wi-Fi роутера.

**Ключевые слова**—Wi-Fi, ширина канала, объединение каналов, межканальная интерференция, внутриканальная интерференция.

## Информация о статье

УДК 004.732

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 02.12.2022, принята к печати 27.12.2022.

**Ссылка для цитирования:** Герасимова Я. А., Светова А. В., Дунайцев Р. А. Исследование влияния межканальной и внутриканальной интерференции на работу сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц в диапазоне 2,4 ГГц // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Том 10. № 4. С. 1–12. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-4-1-12.



# A STUDY OF THE EFFECT OF ADJACENT AND CO-CHANNEL INTERFERENCE ON THE PERFORMANCE OF A WI-FI NETWORK WITH A CHANNEL WIDTH OF 40 MHZ IN THE 2.4 GHZ BAND

J. Gerasimova, A. Svetova, R. Dunaytsev\*

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

\*Corresponding author: [roman.dunaytsev@spbgut.ru](mailto:roman.dunaytsev@spbgut.ru)

**Abstract**—For a long time, Wi-Fi networks have used 22 MHz wide (IEEE 802.11b) and 20 MHz wide (IEEE 802.11a/g) channels only. With the advent of the IEEE 802.11n, it became feasible to combine two adjacent 20 MHz channels to make a 40 MHz channel. By doubling channel width, it is possible to double data rates. However, neighboring Wi-Fi networks using 40 and 20 MHz wide channels can negatively affect each other due to adjacent and co-channel interference. **Research subject.** In this paper, we present the results of an experimental study of parallel operation of two Wi-Fi networks using 40 MHz and 20 MHz channels in the 2.4 GHz band. **Method.** To achieve this goal, the following methods of empirical research were used: measurement and experiment. **Core results.** Using a test bed, parallel operation of neighboring Wi-Fi networks using 40 MHz and 20 MHz channels in the 2.4 GHz band was simulated. Based on the captured traffic, the effective data rate and the retry rate for both Wi-Fi networks were calculated. **Practical relevance.** The obtained results can be used for manual or automatic configuration of Wi-Fi routers.

**Keywords**—Wi-Fi, channel width, channel bonding, adjacent channel interference, co-channel interference.

## Article info

Article in Russian.

Received 02.12.2022, accepted 27.12.2022.

**For citation:** Gerasimova J., Svetova A., Dunaytsev R. A Study of the Effect of Adjacent and Co-Channel Interference on the Performance of a Wi-Fi Network with a Channel Width of 40 MHz in the 2.4 GHz Band // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 4. pp. 1–12. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-4-1-12.



## Введение

Диапазон 2,4 ГГц, используемый в технологии Wi-Fi, занимает участок электромагнитного спектра от 2400 до 2500 МГц и разделен на 14 каналов. Данный диапазон относится к не лицензируемым диапазонам радиочастот, предназначенным для промышленных, научных и медицинских целей (*Industrial, Scientific and Medical, ISM*). Количество доступных каналов зависит от ширины полосы, выделенной местным регуляторным органом (*regulatory body*) в той или иной стране: каналы с 1 по 14 разрешены для использования в Японии, с 1 по 11 – в США, Мексике и Канаде, с 1 по 13 – во всех остальных странах, включая РФ. Ширина каналов зависит от технологии расширения спектра и версии IEEE 802.11. В IEEE 802.11-1997<sup>1</sup> для расширения спектра применяется метод прямой последовательности (*Direct-Sequence Spread Spectrum, DSSS*) и скорость передачи составляет 1 или 2 Мбит/с. В IEEE 802.11b<sup>2</sup> для расширения спектра используется комплементарное кодирование (*Complementary Code Keying, CCK*) и скорость передачи составляет 5,5 или 11 Мбит/с. В обеих версиях ширина канала 22 МГц. В IEEE 802.11g<sup>3</sup> применяется технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*), передача может осуществляться на скоростях 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 и 54 Мбит/с, а ширина канала составляет 20 МГц. В IEEE 802.11n<sup>4</sup> также используется OFDM с шириной канала 20 МГц, но с помощью функции объединения каналов (*channel bonding*) можно получить канал шириной 40 МГц. Набор возможных скоростей здесь достаточно широк: от 6,5 до 600 Мбит/с<sup>5</sup>.

При объединении каналов в Wi-Fi роутере или точке доступа один канал выбирается в качестве основного (*primary channel*), а присоединяемый канал – в качестве дополнительного (*secondary channel*). Основной канал используется для передачи кадров управления (*management frames*) и контроля (*control frames*), а также для передачи кадров данных (*data frames*), если по той или иной причине невозможно использовать канал шириной 40 МГц. Дополнительный канал задействуется вместе с основным при передаче кадров данных устройству,

<sup>1</sup> IEEE Std 802.11-1997 – IEEE 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 // IEEE. November 18, 1997. DOI 10.1109/IEEESTD.1997.85951.

<sup>2</sup> IEEE Std 802.11b-1999 – IEEE 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: Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz Band // IEEE. January 20, 2000. DOI 10.1109/IEEESTD.2000.90914.

<sup>3</sup> IEEE Std 802.11g-2003 – IEEE Standard for Information Technology – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band // IEEE. June 27, 2003. DOI 10.1109/IEEESTD.2003.94282.

<sup>4</sup> IEEE Std 802.11n-2009 – IEEE Standard for Information Technology – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput // IEEE. October 29, 2009. DOI 10.1109/IEEESTD.2009.5307322.

<sup>5</sup> MCS Index Table, Modulation and Coding Scheme Index 11n, 11ac, and 11ax. URL: <https://mcsindex.com/> (дата обращения: 27.11.2022).



также поддерживающему функцию объединения каналов. Поэтому их порой называют каналом управления (*control channel*) и каналом расширения (*extension channel*) соответственно. Возможные схемы объединения каналов в диапазоне 2,4 ГГц представлены на рис. 1. Если основной канал находится в начале или конце диапазона, то существует лишь один возможный вариант дополнительного канала, с которым он может быть объединен. Так, например, если в качестве основного выбран канал 1, то дополнительным для него может стать лишь канал 5. Аналогично, если в качестве основного используется канал 13, то на роль дополнительного может быть назначен только канал 9. Но если же основным установлен канал 5, то присоединить к нему в качестве дополнительного можно как канал 1, так и канал 9. Как правило, в беспроводных настройках Wi-Fi роутера пользователь может либо установить автоматический режим, предоставив устройству самому определять оптимальные параметры, либо выбрать ширину канала (20 или 40 МГц) и основной канал из доступных в данной стране. Возможность задать дополнительный канал у большинства Wi-Fi роутеров отсутствует. В качестве исключения на рис. 2 представлен скриншот интерфейса Wi-Fi роутера Urvel UR-315BN, позволяющего при наличии выбора указать, какой именно канал пользователь желает назначить в качестве дополнительного.

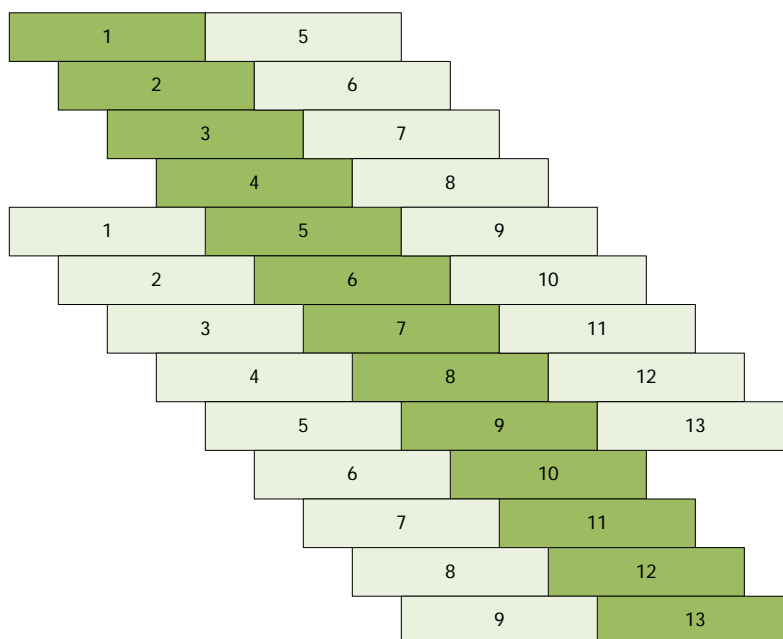


Рис. 1. Схемы объединения каналов в диапазоне 2,4 ГГц  
(темно-зеленым цветом обозначен основной канал, светло-зеленым – дополнительный)

Для указания номера основного и дополнительного канала в литературе и программах для работы с сетями Wi-Fi используются самые разные обозначения. Например, объединение основного канала 5 с дополнительным каналом 9 может быть представлено как 5+9 в Acrylic WiFi, 5@40 в Ekahau, 5 (n40h) в Omnipereek и т. д. В случае же объединения основного канала 9 с дополнительным каналом 5 запись будет иметь вид 9+5 в Acrylic WiFi, 9@40 в Ekahau и 9 (n40l) в Omnipereek, где число «40» означает ширину канала в МГц, а буквы «h» и «l» являются сокращением от «high» (выше) и «low» (ниже) соответственно.



Рис. 2. Интерфейс Wi-Fi роутера Upvel UR-315BN с возможностью выбора варианта дополнительного канала, объединяемого с основным

В диапазоне 2,4 ГГц имеется всего три непересекающихся канала (*non-overlapping channels*) шириной 20 МГц, поэтому в корпоративных сетях с большим количеством точек доступа от использования каналов шириной 40 МГц лучше отказаться. При частотно-территориальном планировании в этом диапазоне, как правило, применяется чередование каналов 1, 6 и 11 (рис. 3а), что позволяет избежать межканальной интерференции (*Adjacent Channel Interference, ACI*) и минимизировать внутриканальную интерференцию (*Co-Channel Interference, CCI*). Но если на одной территории действует несколько сетей Wi-Fi, принадлежащих разным физическим и/или юридическим лицам, то централизованное назначение каналов соседним точкам доступа и Wi-Fi роутерам становится невозможным, а использование каналов приобретает хаотичный характер (рис. 3б). Поскольку для передачи данных в канале шириной 40 МГц задействовано 108 поднесущих вместо обычных 52, используемых в канале IEEE 802.11n шириной 20 МГц, это позволяет при прочих равных условиях увеличить скорость передачи кадров примерно в 2,08 раз<sup>6</sup>. В результате многие производители Wi-Fi роутеров, да и сами пользователи предпочитают задавать ширину канала равной 40 МГц.

<sup>6</sup> MCS Index Table, Modulation and Coding Scheme Index 11n, 11ac, and 11ax. URL: <https://mcsindex.com/> (дата обращения: 27.11.2022).



Однако это практически гарантированно приводит к полному или частичному пересечению каналов с сетями Wi-Fi, работающими по соседству [1, 2].



а) корпоративная сеть

б) многоквартирный дом

Рис. 3. Использование каналов диапазона 2,4 ГГц в сети Wi-Fi СПбГУТ и в жилом многоквартирном доме

### Постановка и проведение экспериментов

Целью данного исследования была оценка влияния межканальной и внутриканальной интерференции на работу сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц в диапазоне 2,4 ГГц. Для этого был собран испытательный стенд, состоящий из двух настольных компьютеров, двух ноутбуков и двух Wi-Fi роутеров (рис. 4). Все оборудование располагалось в одной комнате на расстоянии в несколько метров друг от друга. Для организации между компьютерами и ноутбуками двусторонней передачи данных по протоколу TCP использовалась утилита TamoSoft Throughput Test<sup>7</sup>. Захват трафика, передаваемого в сети Wi-Fi с каналом 40 МГц и в сети Wi-Fi с каналом 20 МГц, выполнялся параллельно на ноутбуках с помощью программы OmnipEEK<sup>8</sup> и Wi-Fi адаптеров NETGEAR A6210.

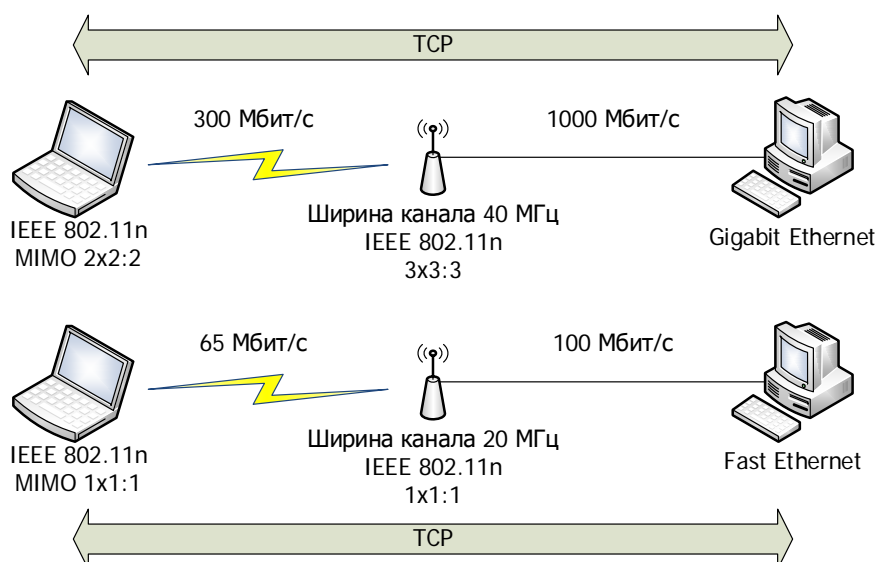


Рис. 4. Испытательный стенд с параллельной работой сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц и сети Wi-Fi с шириной канала 20 МГц в диапазоне 2,4 ГГц

<sup>7</sup> TamoSoft Throughput Test. URL: <https://www.tamos.com/products/throughput-test/> (дата обращения: 27.11.2022).

<sup>8</sup> OmnipEEK. URL: <https://www.liveaction.com/products/omnipEEK-network-protocol-analyzer/> (дата обращения: 27.11.2022).

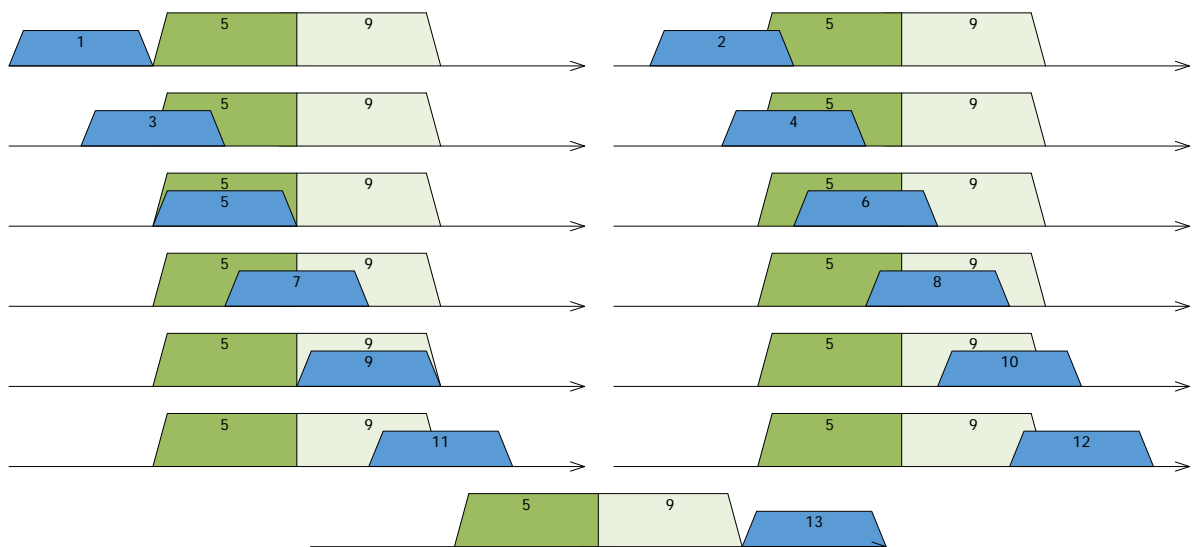
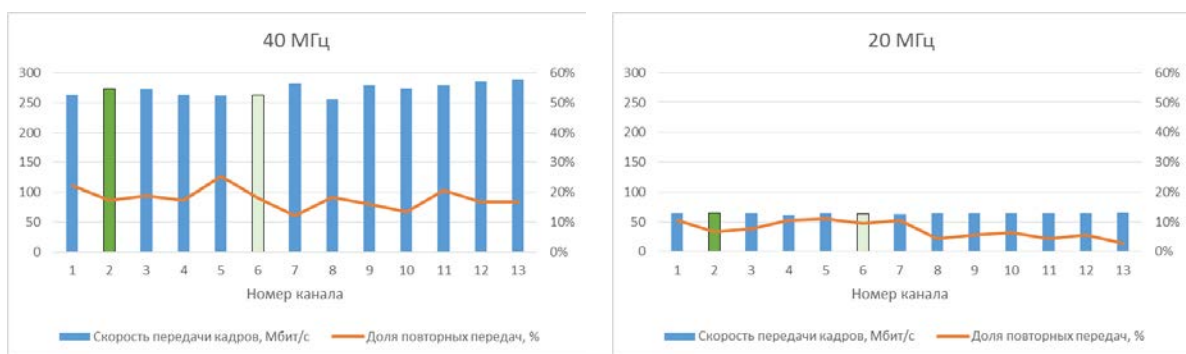


Рис. 5. Смена номера используемого канала шириной 20 МГц для оценки влияния на параллельную работу сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц

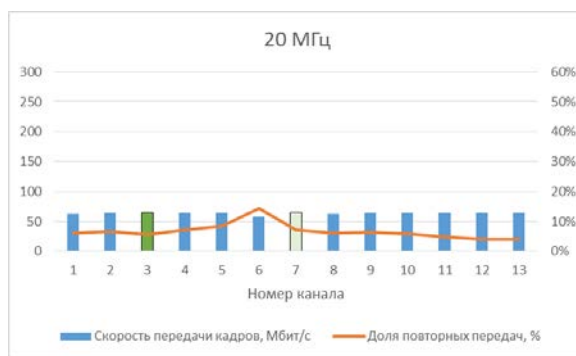
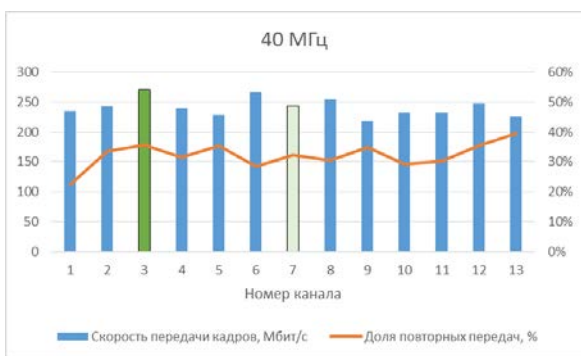
Последующий анализ перехваченных кадров производился с помощью программы Wireshark<sup>9</sup>. Чтобы смоделировать разные варианты пересечения каналов шириной 40 МГц и 20 МГц, для объединенного канала поочередно использовались схемы 2+6, 3+7, 4+8, 5+9, 6+2, 7+3, 8+4 и 9+5. С каждой схемой проводился ряд экспериментов, где в параллельно работающей сети Wi-Fi номер используемого канала шириной 20 МГц последовательно менялся от 1 до 13. На рис. 5 приведен пример сети Wi-Fi с основным каналом 5 и дополнительным каналом 9, работающей параллельно с сетью Wi-Fi с шириной канала 20 МГц (обозначен синим цветом), который поочередно переключается с 1 по 13.

На основе перехваченного двунаправленного трафика TCP рассчитывались средние скорости передачи кадров (*data rate*) и доли повторных передач (*retry rate*) в одной и другой сети Wi-Fi. При этом кадры с неверной контрольной суммой из анализа исключались. Полученные результаты представлены на рис. 6.

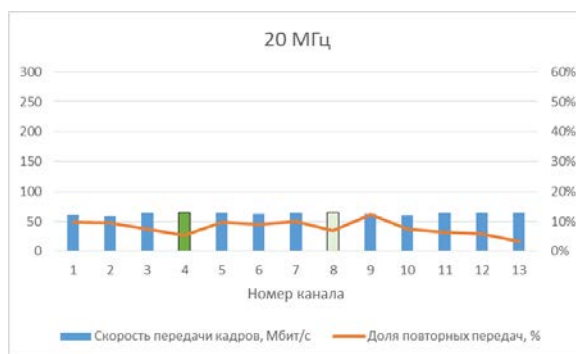
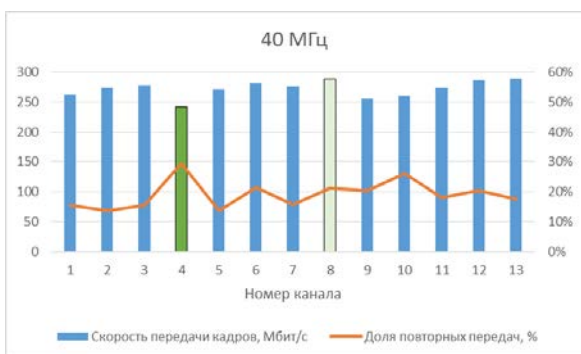


а) схема 2+6

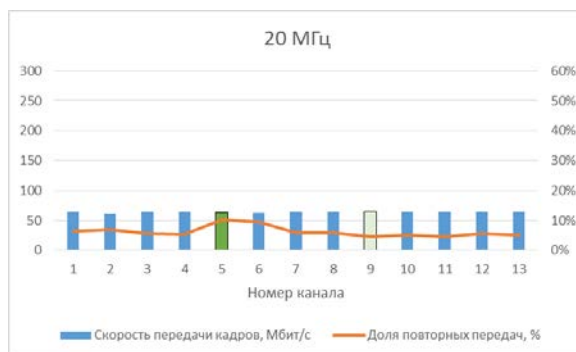
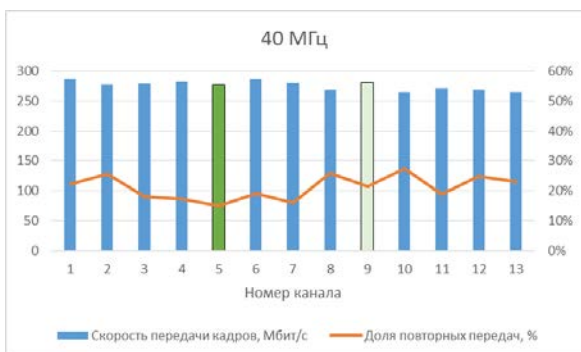
<sup>9</sup> Wireshark. URL: <https://www.wireshark.org/> (дата обращения: 27.11.2022).



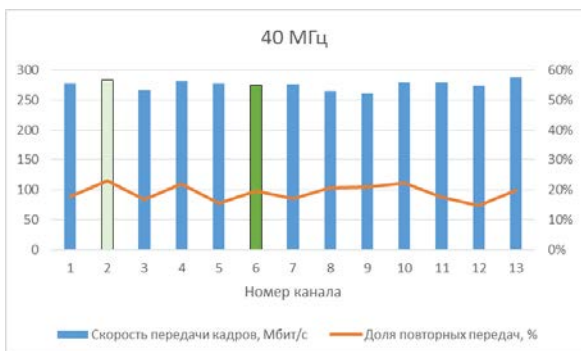
б) схема 3+7



в) схема 4+8

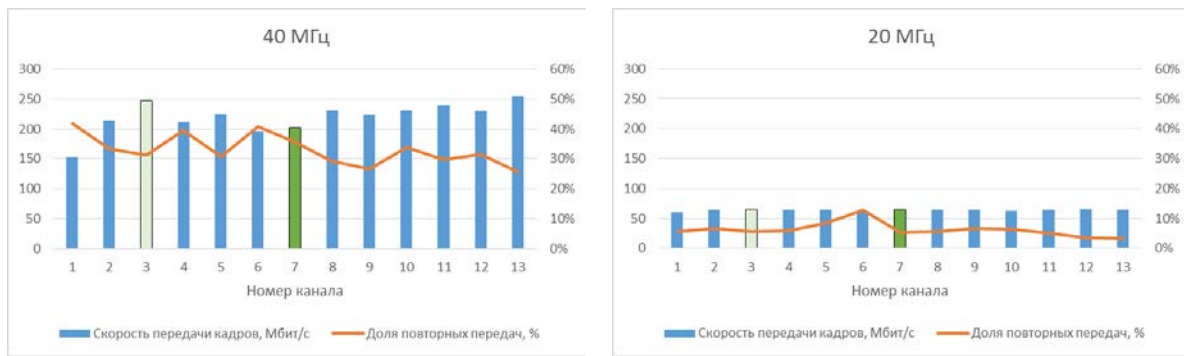


г) схема 5+9

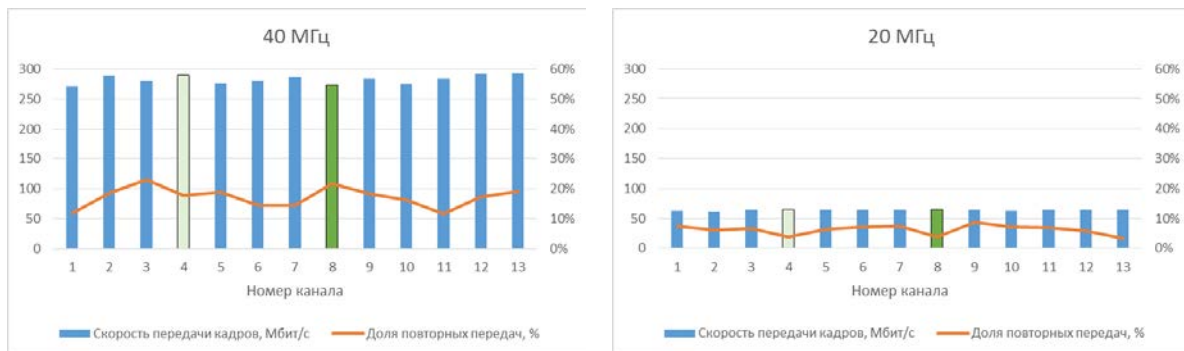


д) схема 6+2

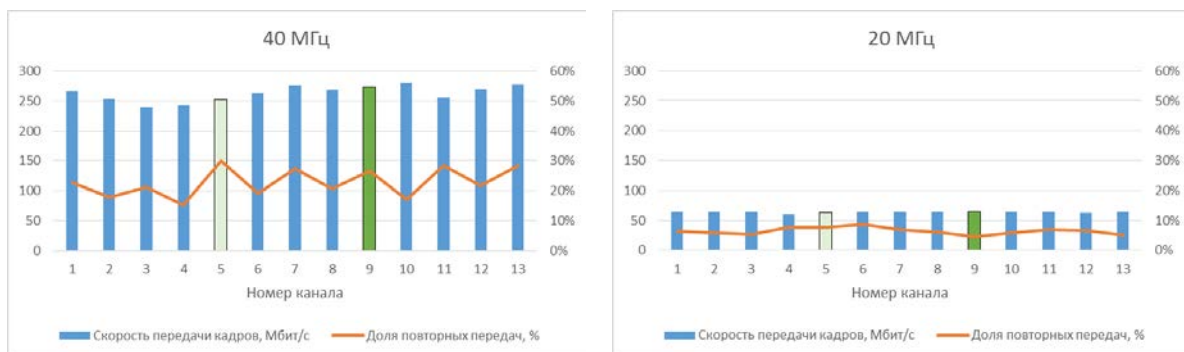




е) схема 7+3



ж) схема 8+4



з) схема 9+5

Рис. 6. Результаты параллельной работы сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц (основной и дополнительный каналы отмечены темно-зеленым и светло-зеленым цветом соответственно) и сети Wi-Fi с шириной канала 20 МГц, поочередно переключавшейся с канала на канал

### Анализ полученных результатов

Любое устройство IEEE 802.11 (включая точки доступа, Wi-Fi роутеры, а также встроенные или внешние Wi-Fi адаптеры), прежде чем приступить к передаче кадра, выполняет оценку занятости канала (*Clear Channel Assessment, CCA*). Если проверка показывает, что канал занят, передача кадра откладывается, если свободен, то устройство приступает к передаче. При использовании канала шириной 20 МГц проверка состоит из двух этапов [3]. В течение первых 4 мкс устройство пытается обнаружить наличие передачи от другого такого же устройства IEEE 802.11 (*Signal Detection, SD*). Порог обнаружения преамбулы подобной



передачи составляет  $-82$  дБм. Если передача не обнаружена, то в течение следующих 4 мкс измеряется уровень мощности помехи в канале (*Energy Detection*, ED). Здесь порог индикации занятости канала на 20 дБ выше и составляет  $-62$  дБм. При использовании же канала шириной 40 МГц проверка доступности основного и дополнительного каналов происходит по-разному. Оценка незанятости основного канала включает в себя этапы SD и ED, как описано выше. На дополнительном канале выполняется лишь проверка ED. В случае если проверка показывает, что основной и дополнительный каналы свободны, устройство приступает к передаче кадра. Все временные интервалы, которые следует выдерживать перед этим, применяются только к основному каналу. Таким образом, можно ожидать, что наложение канала шириной 20 МГц на дополнительный канал соседней сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц будет чаще приводить к коллизиям и повторным передачам кадров, чем при наложении на основной. Однако полученные результаты демонстрируют, что доля повторных передач в сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц не имеет четкой зависимости от варианта пересечения с каналом шириной 20 МГц и варьируется в достаточно широких пределах. Причиной тому могла быть интерференция с другими сетями Wi-Fi, работающими по соседству. Кроме того, передача кадров на высокой скорости сильнее подвержена ошибкам, чем передача в один пространственный поток (*spatial stream*) без объединения каналов. Влияние межканальной и внутриканальной интерференции на работу сети Wi-Fi с шириной канала 20 МГц более заметно. Там доля повторных передач ощутимо возрастает при полном или частичном пересечении используемого канала с каналом шириной 40 МГц и снижается, если каналы 20 МГц и 40 МГц отстоят друг от друга. Также в ряде случаев наблюдается интересная взаимосвязь: при наложении канала шириной 20 МГц на основной или дополнительный канал соседней сети Wi-Fi увеличение/уменьшение доли повторных передач в этих сетях происходит в противофазе. Т.е. когда в сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц доля повторных передач возрастает, в сети Wi-Fi с шириной канала 20 МГц доля повторных передач снижается (см. рис. 6б, 6в, 6д, 6ж, 6з). И наоборот, когда в сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц доля повторных передач уменьшается, в сети Wi-Fi с шириной канала 20 МГц доля повторных передач увеличивается (см. рис. 6а, 6г).

Скорость передачи кадров в сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц варьируется очень сильно: от максимальных 300 Мбит/с до 9 Мбит/с из IEEE 802.11g. Такой разброс обусловлен как сменой схемы модуляции и кодирования (*Modulation and Coding Scheme*, MCS) в ответ на колебания величины отношения сигнал/шум (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR)<sup>10</sup>, так и изменением длины защитного интервала (0,4 или 0,8 мкс), а также числа пространственных потоков (2 или 1). На рис. 7 приведены индексы MCS и длины защитных интервалов кадров, передававшихся в сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц (основной канал 2 с дополнительным каналом 6) при параллельной работе с сетью Wi-Fi с шириной канала 20 МГц (канал 1). Индекс MCS от 0 до 7 означает передачу в один пространственный поток, индекс от 8 до 15 указывает на передачу в два потока.

<sup>10</sup> MCS Table and How to Use It. URL: <https://wlanprofessionals.com/mcs-table-and-how-to-use-it/> (дата обращения: 27.11.2022).



В сети Wi-Fi с шириной канала 20 МГц разброс скоростей передачи кадров значительно скромнее: от максимальных 65 Мбит/с до минимальных 6,5 Мбит/с из IEEE 802.11n. На рис. 8 представлено сравнение скоростей передачи кадров при параллельной работе сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц (основной канал 2 с дополнительным каналом б) и сети Wi-Fi с шириной канала 20 МГц (канал 1).

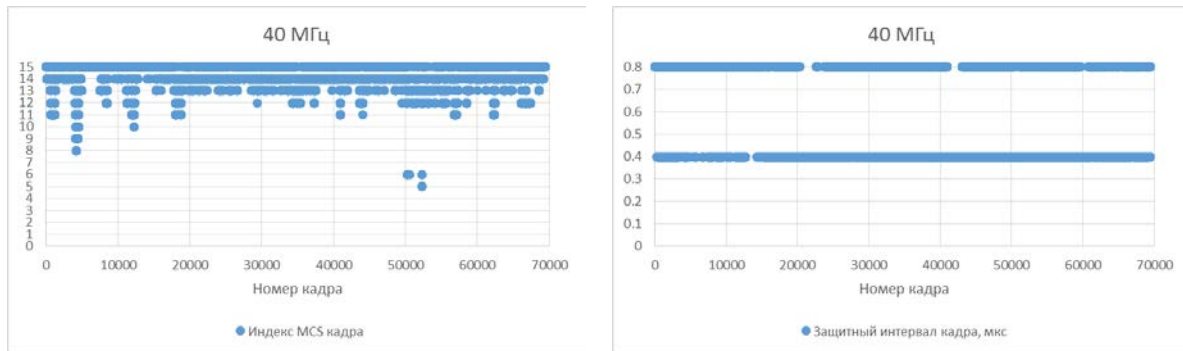


Рис. 7. Индексы MCS и длины защитных интервалов кадров, передававшихся в сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц (схема 2+6) при параллельной работе с сетью Wi-Fi с шириной канала 20 МГц (канал 1)

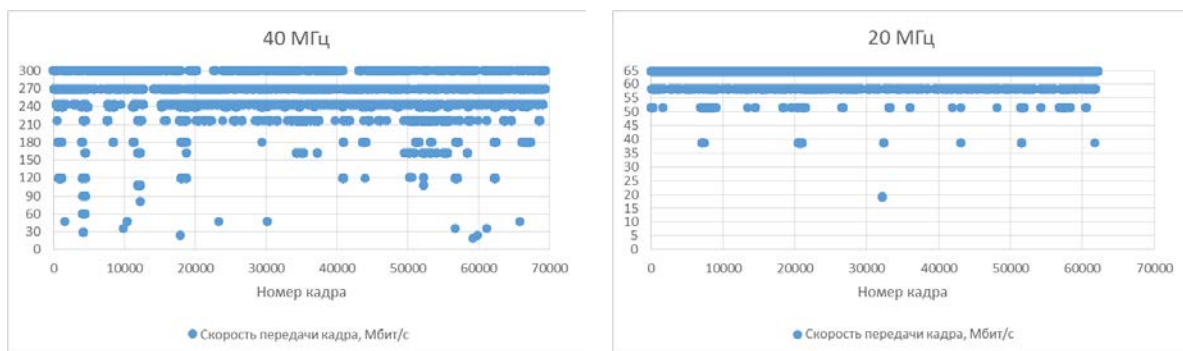


Рис. 8. Скорости передачи кадров, передававшихся в сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц (схема 2+6) и в сети Wi-Fi с шириной канала 20 МГц (канал 1)

## Заключение

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы. Средняя скорость передачи кадров при пересечении каналов изменяется незначительно как при использовании канала шириной 40 МГц, так и при использовании канала шириной 20 МГц. Доля повторных передач при использовании канала шириной 20 МГц, как правило, заметно увеличивается при пересечении с каналом шириной 40 МГц. А вот для последнего характерна достаточно большая частота повторных передач, величина которой в проведенных экспериментах варьировалась в широких пределах, отличаясь порой в 2 раза. Полученные результаты могут быть полезны как при ручном выборе канала в настройках Wi-Fi роутера, так и для использования в алгоритмах автоматической/адаптивной настройки или в программах, оценивающих работу сети Wi-Fi и выдающих рекомендации по ее оптимизации (Acrylic WiFi, Homedale, MetaGeek inSSIDer и т. п.). К сожалению, утилита TamoSoft Throughput Test не позволяет проводить нагрузочное тестирование, максимально загружая беспроводной канал генерируемым



трафиком. Поэтому вопрос о влиянии межканальной и внутриканальной интерференции на пропускную способность сети Wi-Fi с шириной канала 40 МГц в диапазоне 2,4 ГГц, а также на время доставки пакетов и джиттер остается открытым и требует дальнейшего изучения.

*Исследование выполнено в рамках исполнения ПНИ по государственному заданию СПбГУТ на 2022 год.*

### Литература

1. Викулов А. С., Парамонов А. И. Анализ основных видов помех в задаче планирования сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Том 6. № 1. С. 21–31.
2. Антоненко А. Д., Дунайцев Р. А. Исследование работы Wi-Fi в студенческих общежитиях в свете пандемии и дистанционного обучения // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Том 9. № 1. С. 13–25. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-1-13-25.
3. Matthew S. Gast. 802.11n: A Survival Guide. O'Reilly Media, Inc., 2012. 144 p.

### References

1. Vikulov A., Paramonov A.: Analysis of radio interference influence on the design process of the high density Wi-Fi networks // Telecom IT. 2018. Vol. 6. Iss. 1. pp. 21–31 (in Russian).
2. Antonenko A., Dunaytsev R.: A study of Wi-Fi performance in student dormitories in the light of a pandemic and distance learning // Telecom IT. 2021. Vol. 9. Iss. 1. pp. 13–25 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-1-13-25.
3. Matthew S. Gast. 802.11n: A Survival Guide. O'Reilly Media, Inc., 2012. 144 p.

**Герасимова Яна Александровна**

магистрант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
[gerasimova.jana2014@yandex.ru](mailto:gerasimova.jana2014@yandex.ru)

**Gerasimova Jana A.**

Undergraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
[gerasimova.jana2014@yandex.ru](mailto:gerasimova.jana2014@yandex.ru)

**Светова Анастасия Васильевна**

студент Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
[nastya\\_sv00@mail.ru](mailto:nastya_sv00@mail.ru)

**Svetova Anastasia V.**

Student, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
[nastya\\_sv00@mail.ru](mailto:nastya_sv00@mail.ru)

**Дунайцев Роман Альбертович**

PhD, кандидат технических наук, доцент кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
[roman.dunaytsev@spbgtut.ru](mailto:roman.dunaytsev@spbgtut.ru)

**Dunaytsev Roman A.**

PhD, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
[roman.dunaytsev@spbgtut.ru](mailto:roman.dunaytsev@spbgtut.ru)