

Экспериментальное исследование резервирующих сигналов в UL-NOMA Wi-Fi *

Р.А. Зарипов, А.А. Куреев
{zaripov, kureev}@wireless.iitp.ru

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

Аннотация Одним из способов повышения пропускной способности в сетях Wi-Fi является использование неортогонального множественного доступа (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), который позволяет передавать и принимать несколько сигналов одновременно на одной частоте. Несмотря на существование прототипа NOMA Wi-Fi в нисходящем канале, для реализации NOMA в восходящем канале необходимо преодолеть ряд проблем. Одной из этих проблем является организация синхронной передачи нескольких станций. Для решения этой проблемы предлагается использовать механизм RTS/CTS с добавлением резервирующих сигналов для выбора станций, которые будут передавать данные с помощью NOMA в восходящем канале. В качестве резервирующего сигнала в работе используется шум на определенных частотах. Изучены свойства такого сигнала. Определены оптимальные параметры сигнала.

1 Введение

На данный момент Wi-Fi является одной из основных технологий для беспроводного доступа в интернет благодаря низкой стоимости развертывания и обеспечению высокой скорости передачи данных конечному пользователю. Например, стандарт IEEE 802.11ax, известный как Wi-Fi 6, позволяет развить максимальную пропускную способность до 10 Гбит/с [1]. Более того, разрабатывается стандарт IEEE 802.11be, известный как Wi-Fi 7, который нацелен на достижение пропускной способности до 40 Гбит/с [2].

Требованиям к сетям Wi-Fi растут, а именно: растут требования к максимальной пропускной способности сети Wi-Fi, к задержкам при передаче данных и к обеспечению высокой пропускной способности в условиях, когда к сети подключено большое количество устройств разных поколений технологии Wi-Fi. Одним из способов удовлетворения данных требований является использование неортогонального множественного доступа (англ.:

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда к 21-19-00846, <https://rscf.ru/project/21-19-00846/>

Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA). NOMA позволяет передавать данные в одном частотном и временном диапазоне, разделяя сигналы по мощности. Технологию NOMA используют как в нисходящем канале, так и в восходящем канале.

NOMA в нисходящем канале (англ.: Downlink-NOMA, DL-NOMA) предполагает передачу точкой доступа данных одновременно нескольким станциям с помощью одной антенны. Исследованию DL-NOMA посвящена работа [3].

При использовании NOMA в восходящем канале (англ.: Uplink-NOMA, UL-NOMA) несколько станций осуществляют передачу одновременно, а точка доступа получает на антенну суперпозицию всех переданных сигналов.

Рассмотрим принцип работы UL-NOMA. Основной будем называть станцию, которая находится далеко от точки доступа, следовательно, имеет плохие каналные условия, NOMA-станцией называем станцию, которая находится ближе к точке доступа и имеет хорошие каналные условия. Станции независимо отправляют данные точке доступа. В канале происходит сложение сигналов от двух станций. Суперпозицию сигналов от двух станций будем называть NOMA-кадром. Точка доступа принимает NOMA-кадр и с помощью метода последовательного подавления помех (англ.: Successive Interference Cancellation, SIC) декодирует сигнал. Сначала декодируется сигнал от станции с лучшими каналными условиями, при этом данные от основной станции точка доступа принимает за шум. Затем применяется SIC для вычитания кадра NOMA-станции из принятого NOMA-кадра для декодирования кадра от основной станции.

NOMA в восходящем канале может быть асинхронной и синхронной. В асинхронной NOMA, рассмотренной в работе [4] данные от основной станции и NOMA-станции могут приходиться на точку доступа в произвольный момент времени, в то время как в синхронной NOMA начало кадра от основной станции и начало кадра от NOMA-станции должны приходиться на точку доступа одновременно. В данной работе рассматривается синхронная NOMA.

Для того, чтобы реализовать синхронную NOMA в сетях Wi-Fi, необходимо решить ряд проблем.

Первая проблема — обеспечение синхронной передачи данных от NOMA-станции и от основной станции. Вторая проблема — выбор станций, участвующих в передаче. На точке доступа должен быть реализован алгоритм выбора наиболее подходящих станций для NOMA-передачи, так как одновременно несколько станций могут быть готовы участвовать в передаче. Последняя проблема — декодирование NOMA-кадра. На точке доступа должен быть реализован метод последовательного подавления помех для разделения NOMA-кадра.

В данной работе для решения первой проблемы предлагается использовать механизм Request-to-Send/Clear-to-send(RTS/CTS), при котором RTS-кадр отправляется основной станцией. Для выбора станций, участвующих в передаче NOMA, предлагается использовать резервирующие сигналы (ан-

гл.: Reservation signal, RS). Алгоритм работы предлагается следующий. Основная станция отправляет RTS-кадр точке доступа. NOMA-станции, при обнаружении RTS-кадра, отправляют RS-сигнал. Точка доступа принимает RTS-кадр и резервирующие сигналы от всех NOMA-станций. Далее она выбирает станцию, которая будет передавать параллельно с основной станцией. Наконец, точка доступа отправляет CTS-кадр основной станции и резервирующий сигнал NOMA-станции. Через интервал времени SIFS (16 мкс) станции могут посылать данные точке доступа одновременно.

Резервирующие сигналы должны быть ортогональны между NOMA-станциями, потому что NOMA-станции отправляют RS-сигнал одновременно. В данной работе для обеспечения ортогональности сигналов предлагается использовать разделение RS-сигналов по частоте. Однако, необходимо определить, какой частотный диапазон будет занимать один резервирующий сигнал и какое расстояние по частоте следует выбрать между RS-сигналами для двух разных станций. В данной работе разработан RS-сигнал, позволяющий резервировать канал, а также проведено его экспериментальное исследование. В частности, определено качество распознавания RS-сигналов в зависимости от их параметров.

Для исследования RS-сигнала разработаны приемник и передатчик, основанные на программно определяемом реконфигурируемом радиоустройстве (англ.: Universal Software Radio Peripheral, USRP). Для программирования USRP использована среда разработки LabVIEW, позволяющая создавать прототипы систем беспроводной связи. Основой программы является 802.11 Application Framework — упрощенная реализация протокола IEEE 802.11a с открытым исходным кодом [5].

Работа имеет следующую структуру. В разделе 2 приведен обзор работ, посвященных технологии NOMA и использованию резервирующих сигналов. В разделе 3 описывается формат резервирующего сигнала. Раздел 4 описывает постановку эксперимента и полученные результаты. В разделе 4 проведен численный анализ результатов, в разделе 5 представлены выводы и направления дальнейших исследований.

2 Обзор литературы

Под технологией NOMA подразумевают большое количество способов доступа к каналу, обзор которых приведен в работе [6]. Например, помимо технологий NOMA, описанных во введении, существует кооперативная NOMA [7], в которой станции с хорошими канальными условиями являются посредниками передачи данных между точкой доступа и станцией с плохими канальными условиями.

Научное сообщество предложило большое количество способов для реализации алгоритмов, которые поддерживают NOMA, их обзор приведен в работе [8], а в работе [9] предложена универсальная схема для NOMA-приемника, на основе которой можно реализовать большое количество предложенных схем работы NOMA.

NOMA доказала эффективность в сетях 5G [10,11]. NOMA в нисходящем канале хорошо изучена в сетях Wi-Fi [12], в работе [3] представлен прототип станции Wi-Fi и экспериментальные результаты, демонстрирующие прирост средней геометрической пропускной способности для сети Wi-Fi, состоящей из двух станций и одной точки доступа. NOMA в восходящем канале также изучена в сетях W-Fi. В работе [13] описан принцип работы NOMA-приемника и построена имитационная модель приема NOMA-кадров, в работе [14] представлена имитационная модель NOMA в восходящем канале, но до сих пор не существует экспериментальных подтверждений эффективности NOMA в сетях Wi-Fi. Таким образом, исследование UL-NOMA в сетях Wi-Fi является актуальным.

Для реализации UL-NOMA в сетях Wi-Fi необходимо разработать ортогональные резервирующие сигналы. Идея использовать короткие ортогональные сигналы для индикации событий не нова. В работе [15] предлагается использовать корреляционные последовательности вместо RTS/CTS. Авторы заметили, что информацию, которую несет в себе кадр подтверждения (англ.: Acknowledgement, ACK) можно закодировать последовательностью длиной в 9 раз меньшей длительности кадра RTS и CTS, переданных на наиболее надежной сигнально-кодовой конструкции. В работе [16] описано как такой сигнал может быть использован для оценки канальных условий. Пример использования таких сигналов для резервирования канала представлен в работах [17,18]. В данных работах для устранения конфликта 5G и Wi-Fi в 5 ГГц диапазоне предлагается заполнять резервирующим сигналом пустые промежутки между 5G-кадрами, чтобы сети Wi-Fi не вмешивались в передачу данных 5G.

3 Свойства резервирующего сигнала

Рассмотрим работу механизма RTS/CTS с RS-сигналами для осуществления передачи с помощью UL-NOMA. На рис. 1 приведен пример работы механизма.

1. Основная станция отправляет RTS-кадр точке доступа. NOMA-станции, услышав RTS-кадр, отправляют резервирующий сигнал, при наличии данных для отправки.
2. Точка доступа решает, какая из NOMA-станций будет осуществлять передачу совместно с основной станцией. Далее она отправляет CTS-кадр и резервирующий сигнал выбранной NOMA-станции.
3. Основная и NOMA-станция отправляют данные.
4. Точка доступа декодирует NOMA-кадр и отправляет ACK одновременно для двух станций с помощью DL-NOMA.

3.1 Детектирование резервирующего сигнала

Для передачи кадров в сетях Wi-Fi используется технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (англ.: Orthogonal

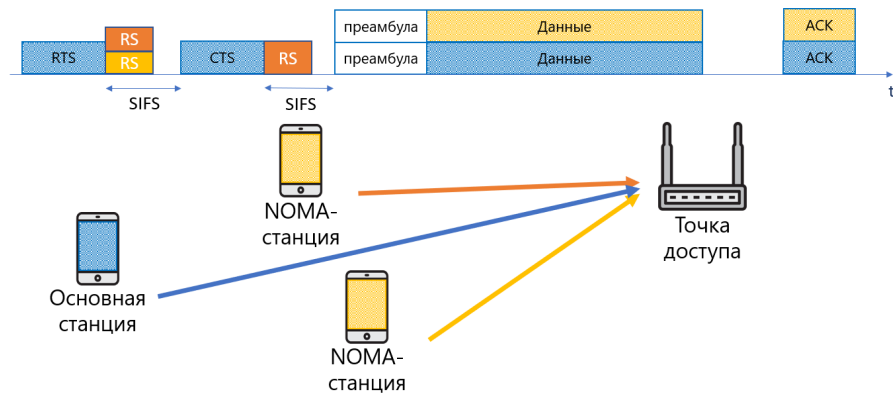


Рис. 1: Пример передачи в UL-NOMA с помощью механизма RTS/CTS с резервирующими сигналами.

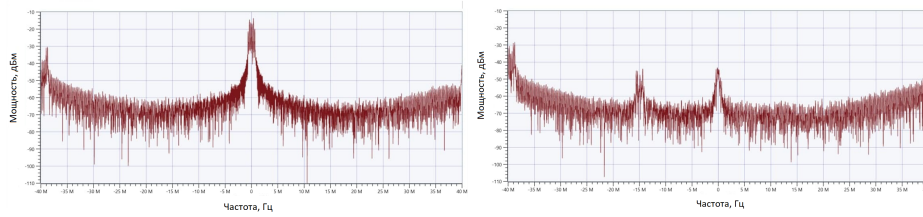
frequency-division multiplexing, OFDM). В стандарте IEEE 802.11a один OFDM-символ передается на 64 поднесущих, каждая шириной в 312.5 кГц. Ортогональности RS-сигналов можно добиться, если выделить каждой NOMA-станции свой набор поднесущих для передачи RS-сигнала. Для удобства будем рассматривать RS-сигналы шириной в целое число поднесущих, при этом длительность RS-сигнала предлагается принять равной длительности одного OFDM-символа, используемого в стандарте IEEE 802.11a. Определять наличие RS-сигнала предлагается по мощности сигнала.

Если станции A и B будут передавать RS-сигнал на разных поднесущих, то приемник сможет сепарировать эти два сигнала с помощью полосовых фильтров. После фильтрации приемник по мощности сигнала определит наличие RS-сигнала. Таким образом, используется несколько фильтров, полосы пропускания которых настроены на разные частоты.

Например, на Рис. 2 приведены сигналы в частотной области после двух фильтров. В случае Рис. 2а сигнал точно попал на середину полосы пропускания фильтра, в случае Рис. 2б сигнал остался левее полосы пропускания фильтра. Полоса пропускания фильтра в обоих случаях находилась на нулевой частоте.

Видно, что мощность, равная площади под графиком в первом случае больше, чем во втором, значит точка доступа сможет определить наличие RS-сигнала, измеряя мощность после фильтров.

Осталось только определить параметры размера RS-сигнала и расстояния между RS-сигналами в частотной области, при которых еще возможно декодирование резервирующего сигнала. В данной работе даны ответы на эти вопросы.



(а) RS-сигнал попал на полосу пропускания фильтра
 (б) RS-сигнал остался левее полосы пропускания фильтра

Рис. 2: Спектр сигналов после полосовых фильтров.

3.2 Интервал SIFS в Wi-Fi

Для реализации UL-NOMA в течение интервала SIFS (16 мкс) после RTS NOMA-станция должна отправить RS-сигнал, а точка доступа должна его декодировать. Рассмотрим из чего состоит интервал SIFS.

По спецификации IEEE 802.11i [19] 14 мкс из 16 мкс интервала времени уходит на анализ сигнала на уровне MAC, на анализ сигнала в частотной области и на анализ битовой последовательности. Предлагаемый в данной работе RS-сигнал не требует анализа на уровне MAC и PHY, следовательно, освобождается 14 мкс. Так как длина RS-сигнала равна одному OFDM-символу (4 мкс), останется 10 мкс на выделение RS-сигнала фильтром и измерение его мощности. Экспериментально определено, что 10 мкс достаточно для обработки RS-сигнала.

4 Разработка RS-сигнала

Детектирование RS-сигнала осуществляется измерением мощности отфильтрованного сигнала. Если полоса пропускания фильтра точно попала на RS-сигнал, то на выходе будет большая мощность, обозначим эту мощность P_1 . Мощность в случае, когда полоса пропускания не попала на RS-сигнал, обозначим P_2 . Для устойчивого декодирования RS-сигнала нужна большая разница по мощности между этими случаями. В эксперименте измеряется разность этих мощностей, обозначенная как ΔP . Для этого на основе 802.11 Application Framework разработаны прототипы основной станции и NOMA-станции.

4.1 Алгоритм работы станций

Опишем функции прототипов. У NOMA-станции только одна функция: на любой RTS-сигнал от основной станции она отправляет RS-сигнал.

Основная станция отправляет RTS-сигнал и ждет ответ от NOMA-станции. RS-сигнал, отправленный в ответ на RTS-сигнал она пропускает через два

фильтра. Основная станция изначально не знает в какой полосе находится принимаемый RS-сигнал, поэтому пропускает сигнал через все фильтры. В эксперименте использовалось два фильтра. Полоса пропускания одного фильтра точно попадает на частотную область резервирующего сигнала, полоса пропускания другого сдвинута на некоторое расстояние по частоте. Расстояние по частоте между фильтрами, ширина RS-сигнала и полоса пропускания фильтра в экспериментах кратны целому числу поднесущих.

4.2 Характеристики фильтров

Фильтры построены с помощью утилиты Filter Design, которая встроена в LabVIEW2019. В работе использованы фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры).

В работе выбраны КИХ-фильтры с порядком равным 122. Порядок фильтра — это его количество нулей и полюсов. Чем больше порядок фильтра тем лучше будут его характеристики: сильнее затухание в полосе подавления (это частоты, которые фильтр подавляет), меньше полоса перехода (это переходная область между полосой пропускания и полосой подавления), меньше неровностей в полосе пропускания (это частоты, которые фильтр пропускает). Но, чем выше порядок фильтра, тем больше требуется ресурсов и тем больше будет задержка на обработку сигнала. Экспериментально определено, что 122 — максимальный порядок фильтра, с которым справляется компилятор программируемого радио.

Такой низкий порядок фильтра накладывал ограничения на эксперимент. С таким порядком невозможно создать фильтр с полосой пропускания равной одной поднесущей. Для маленьких RS-сигналов (3-4 поднесущих) полоса пропускания получилась слишком большой (4-5 поднесущих), для больших RS-сигналов (7-8 поднесущих) сказывалось распределение мощности по большому количеству поднесущих. Передающее устройство посылает сигнал с постоянной мощностью. При отправке сигнала на одной поднесущей, мощность передающего устройства концентрируется в узкой частотной области. При передаче на нескольких поднесущих, мощность равномерно распределяется по широкой полосе, что ухудшает фильтрацию.

4.3 Численные результаты

Параметры эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры эксперимента

Параметр	Значение
Ширина канала	20 МГц
Ширина RS-сигнала в поднесущих, S	3-8
Расстояние между RS-сигналами в поднесущих	0-29
Порядок фильтра	122

В эксперименте измерялась разность мощностей ΔP в зависимости от ширины RS-сигналов и расстояний между ними. ΔP не зависит от мощности сигнала на приемнике. Чтобы доказать это, была измерена ΔP в зависимости от принимаемой мощности для RS-сигнала шириной в 5 поднесущих.

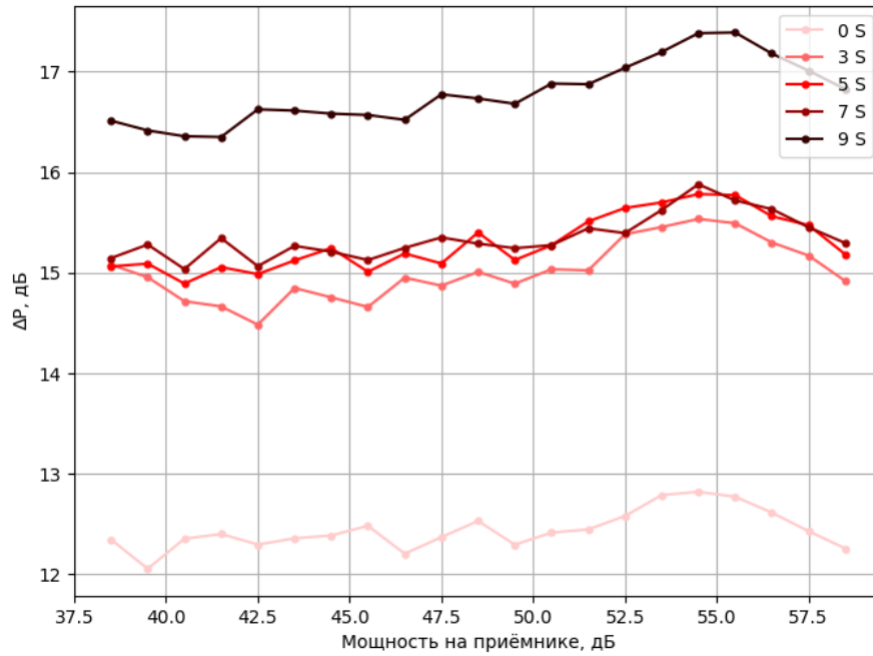


Рис. 3: Зависимость ΔP от мощности сигнала на приемнике для разных расстояния между RS-сигналами.

На Рис. 3 разными цветами обозначены кривые, соответствующие различным расстояниям S поднесущих между RS-сигналами.

Видно, что ΔP слабо зависит от мощности на приемнике. Это объясняется тем, что при увеличении мощности на приемнике, P_1 и P_2 увеличиваются на одну и ту же величину. Значит, ΔP не изменится, потому что $\Delta P = P_1 - P_2$.

Основная задача работы — определить размер RS-сигнала и расстояние между соседними RS-сигналами, при которых возможно декодирование RS-сигналов. Рис. 4 иллюстрирует зависимость ΔP от расстояния между RS-сигналами и от длины RS-сигнала. По данному графику можно определить качество распознавания RS-сигнала в зависимости от этих параметров.

Из графика видно, что кривая, соответствующая значению $S = 5$ лежит выше всех. Это означает, что при одинаковом расстояния между RS-сигналами размер RS-сигнала равный 5 поднесущих дает наибольшую ΔP ,

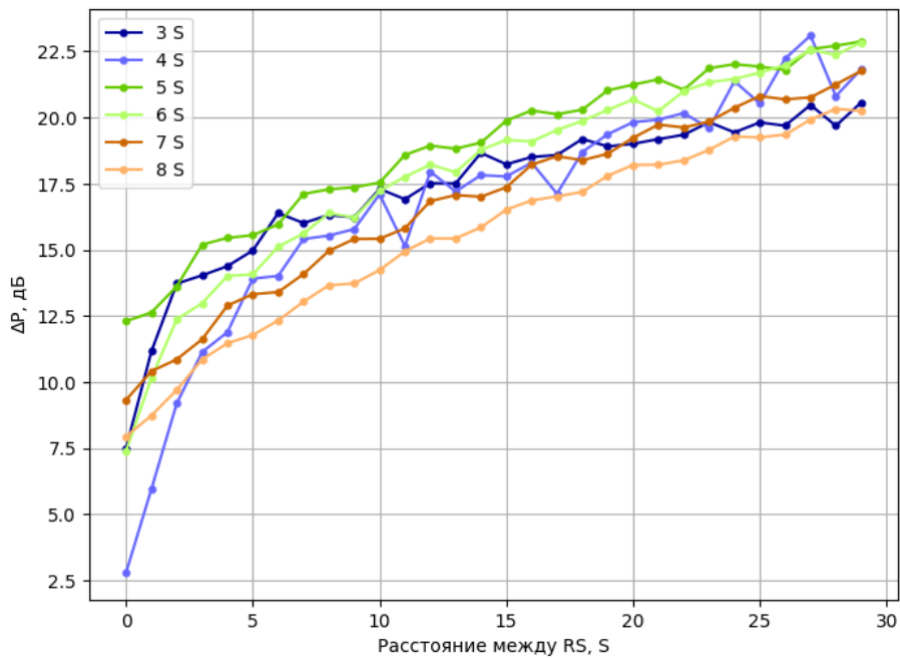


Рис. 4: Зависимость ΔP от расстояний между RS-сигналами для разных размеров RS-сигналов.

значит приемник стабильнее всего сможет декодировать этот RS-сигнал. Расстояние между RS-сигналами целесообразно взять равное 3 поднесущим, потому что после 3 поднесущих ΔP увеличивается гораздо медленнее. При таком подходе в одном OFDM символе можно выделить место для $52/(5+3) = 6$ станций.

При небольшом расстоянии между RS-сигналами ΔP тоже мало, потому что полосовые фильтры имеют большие хвосты и слабо подавляют сигналы, которые находятся близко к полосе пропускания.

Кривые в целом растут, потому что при большем расстоянии между RS-сигналами хвосты фильтров захватывают все меньше сигнала, а значит, сильнее его подавляют.

RS-сигналы размеров меньше 5 поднесущих показывают плохой результат. Из-за низкого порядка полоса перехода таких фильтров намного больше размера RS-сигнала, следовательно, фильтры будут плохо подавлять соседние сигналы.

RS-сигналы размеров больше 5 поднесущих тоже показывают плохой результат, потому что мощность передачи распределяется по всему частотному спектру, а фильтры, имеют большое затухание в полосе пропускания и

имеют большие хвосты. Следовательно, такие фильтры уменьшают P_1 и увеличивают P_2 . ΔP от этого уменьшается.

5 Заключение

В данной работе исследован RS-сигнал, который может быть применен в сетях Wi-Fi, использующих UL-NOMA для резервирования канала. Определены минимальный размер RS-сигнала и расстояние между RS-сигналами, при которых точка доступа сможет определить наличие RS-сигнала с точностью до 15 дБ. При таком подходе в полосе 20 МГц 6 станций одновременно могут отправить резервирующий сигнал.

Данный метод будет эффективен, когда станции Wi-Fi находятся в стационарном состоянии в слабоменяющейся среде, потому что на разность мощности RS-сигнала после прохождения фильтров влияют состояние среды и расстояние между станциями. Чтобы учесть изменение среды и положение станций, в будущих работах будет изучен резервирующий сигнал, основанный на корреляционных последовательностях.

Список литературы

1. IEEE P802.11ax - IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment Enhancements for High Efficiency WLAN. — 2017.
2. Evgeny Khorov Ilya Levitsky, Akyildiz Ian F. Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7 // IEEE Access. — 2020.
3. Evgeny Khorov Aleksey Kureev Ilya Levitsky, Akyildiz Ian F. Prototyping and Experimental Study of Non-Orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks // IEEE Network. — 2020. — Vol. 18, no. 8. — P. 12–19.
4. Г.С. Королев А.А. Куреев Е.М. Хоров. Имитационное исследование Uplink NOMA в сетях Wi-Fi. — 2020.
5. LabVIEW Communications 802.11 Application Framework 1.1 White Paper. — 2020.
6. Neng Ye Hangcheng Han Lu Zhao Ai-hua Wang. Uplink Nonorthogonal Multiple Access Technologies Toward 5G: A Survey // Wireless Communications and Mobile Computing. — 2018. — Vol. 18. — P. 26.
7. Ding Zhiguo, Peng Mugen, Poor H. Vincent. Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems // IEEE Communications Letters. — 2015. — Vol. 19, no. 8. — P. 1462–1465.
8. Comprehensive Study of NOMA Schemes / Wang Chao, Wu Yiqun, Chen Yan, and Bayesteh Alireza. — 2019. — P. 1–5.
9. A Universal Receiver for Uplink NOMA Systems / Meng Xiangming, Wu Yiqun, Wang Chao, and Chen Yan. — 2018. — P. 117–121.
10. Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks / Ding Zhiguo, Liu Yuanwei, Choi Jinho, Sun Qi, Elkashlan Maged, Chih-Lin I., and Poor H. Vincent // IEEE Communications Magazine. — 2017. — Vol. 55, no. 2. — P. 185–191.

11. An Overview of NonOrthogonal Multiple Access / Benjebbour Anass, Saito Keisuke, Li Anxin, Kishiyama Yoshihisa, and Nakamura Takehiro. — 2015. — P. 1–6.
12. A Practical Downlink NOMA Scheme for Wireless LANs / Kheirkhah Sangdeh Pedram, Pirayesh Hossein, Yan Qiben, Zeng Kai, Lou Wenjing, and Zeng Huacheng // IEEE Transactions on Communications. — 2020. — Vol. 68, no. 4. — P. 2236–2250.
13. Ghazi Hind Salim, Wesolowski Krzysztof. Uplink NOMA Scheme for Wi-Fi Applications // INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS. — 2018. — Vol. 64, no. 4. — P. 481–485.
14. Pavan B.S. Harigovindan V.P. A novel channel access scheme for NOMA based IEEE 802.11 WLAN. — 2021.
15. Eugenio Magistretti Omer Gurewitz Edward W. Knightly. 802.11ec: Collision Avoidance without Control Messages. — 2012.
16. da Silva Mello Carlos V. Rodríguez Ron M. P. C. Almeida Alexander B. Hilario Tacuri Pedro Gonzalez Castellanos L. H. Gonsioroski Marcelo Molina Silva Luiz. Performance Analysis of LBT with Limited Reservation Signal Duration for Fair LTE-LAA/Wi-Fi Coexistence // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications [online]. — 2019. — Vol. 18, no. 4. — P. 505–529.
17. Loginov Vyacheslav, Lyakhov Andrey, Zhdanovskiy Vyacheslav. Performance Analysis of LBT with Limited Reservation Signal Duration for Fair LTE-LAA/Wi-Fi Coexistence. — 2019. — P. 1–5.
18. Medium access design for LTE in unlicensed band / Bhorkar Abhijeet, Ibars Christian, Papathanassiou Apostolos, and Zong Pingping. — 2015. — P. 369–373.
19. IEEE. "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. — 2012.