

Прототип приемника UL-NOMA в Wi-Fi *

Р.А. Злобин, А.А. Куреев
{zlobin, kureev}@wireless.iitp.ru

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва
Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

Аннотация Неортогональный множественный доступ (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) является одной из наиболее перспективных технологий для внедрения в сетях Wi-Fi будущего. NOMA позволяет осуществить одновременную передачу нескольким устройствам на одной частоте, разделяя сигнал по мощности. На данный момент существует прототип NOMA Wi-Fi в нисходящем канале, но для реализации NOMA в восходящем канале (англ.: Uplink Non-Orthogonal Multiple Access, UL-NOMA) необходимо преодолеть ряд трудностей: производить независимую оценку каналов при приеме двух кадров от разных станций, правильно корректировать фазу по перекрывающимся пилотным поднесущим, а также обеспечить совместимость с прошлыми поколениями устройств. В данной работе представлен прототип приемника, который способен обрабатывать суперпозицию двух кадров разных мощностей, переданных с помощью UL-NOMA, описан процесс обработки сигналов на физическом уровне, и экспериментально показана возможность приема двух кадров при использовании технологии UL-NOMA.

Ключевые слова: неортогональный доступ, независимая оценка каналов, пилотные поднесущие, Wi-Fi.

1 Введение

На сегодняшний день Wi-Fi является одной из самых популярных технологий для беспроводного доступа в интернет [1]. Разработанная в 1997 году Институтом инженеров электротехники и электроники (англ.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) как стандарт IEEE 802.11, технология Wi-Fi непрерывно развивается. Разрабатываемое на данный момент дополнение IEEE 802.11be, именуемое Wi-Fi 7, нацелено на достижение пропускной способности до 40 Гбит/с, а также на поддержку приложений реального времени [2]. В связи с ростом числа подключенных устройств к сети и непрерывным повышением требований к скорости передачи данных в сетях

* Исследование выполнено в ИПФИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00846, <https://rscf.ru/project/21-19-00846/>

Wi-Fi необходимо использование новых методов передачи данных. Одним из них является метод неортогонального множественного доступа в восходящем канале (англ.: Uplink Non-Orthogonal Multiple Access, UL-NOMA), зарекомендовавший себя в сетях сотовой связи [3]. Используя этот метод, возможно передавать и принимать сразу несколько сигналов в одном и том же частотно-временном ресурсе, разделяя их по разности в мощностях.

Рассмотрим работу технологии UL-NOMA на примере сети, изображенной на рис. 1. Она состоит из точки доступа и двух станций с разными канальными условиями. Первая станция находится далеко от точки доступа и имеет плохие канальные условия, а вторая находится близко и, соответственно, имеет лучшее качество канала, по сравнению с первой станцией. Wi-Fi основывается на использовании метода случайного доступа с избеганием коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA), который подразумевает, что только одна станция может передавать данные в заданном частотном и временном диапазоне. Применяя технологию UL-NOMA, станции могут передавать кадры точке доступа в одном частотном диапазоне одновременно. Назовем станцию с плохими канальными условиями основной, а кадр, который она посылает — основным. Другую станцию назовем NOMA-станцией, посылающей вложенный кадр, имеющий большую мощность на точке доступа. Считаем, что кадры от обеих станций передаются синхронно, и на точку доступа приходит суперпозиция сигналов. Этот суммарный сигнал называется NOMA-кадром, в нем сигналы от разных станций разделяются по мощностям.

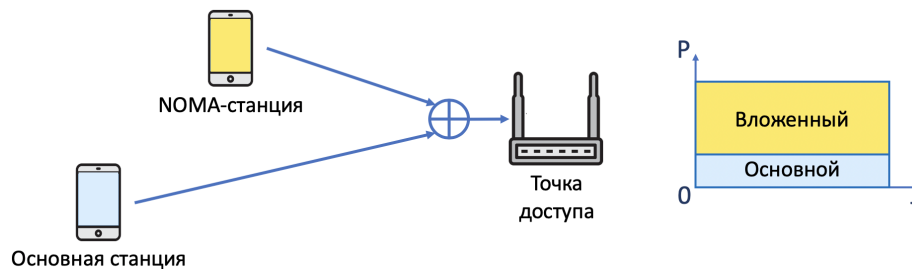


Рис. 1: Пример использования NOMA в восходящем канале.

Для успешного декодирования вложенного и основного кадров от двух станций из одного NOMA-кадра используется метод параллельного подавления помех (англ.: Parallel Constellation Demapping, PCD), который реализуется на принимающей стороне. При использовании PCD, приемник декодирует сигналы обоих кадров параллельно, используя информацию о сигнале большей мощности сразу же для декодирования сигнала меньшей мощности. Однако, для обработки основного кадра, необходимо произвести точ-

ную оценку канала вложенного кадра и корректировать набегающую фазу по пилотным поднесущим сигналам. Так как оба кадра приходят на приемник одновременно, то происходит наложение преамбул и пилотных сигналов, и принять основной кадр становится невозможно.

В данной работе разработана структура вложенного кадра и метод, решающий вышеперечисленные проблемы, с помощью которого можно принимать NOMA-кадры, даже если основная станция является устройством, не поддерживающим технологию UL-NOMA. Экспериментально исследовано, как разность мощностей между основным и вложенным кадрами влияет на прием каждого из них.

Работа устроена следующим образом. В разделе 2 приводится описание литературы по исследуемой теме. Раздел 3 описывает модифицированную структуру вложенного кадра, для использования технологии UL-NOMA. В разделе 4 представлен механизм работы NOMA-приемника. В разделе 5 описана постановка эксперимента и анализ полученных результатов. Раздел 6 завершает работу.

2 Обзор литературы

Изучению технологии UL-NOMA посвящено большое количество исследований. В работах [4,5,6] авторы описывают механизм UL-NOMA в сетях 5G и исследовано улучшение производительности системы по сравнению с множественным доступом с ортогональным разделением частот (англ.: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA). Технология NOMA не может быть напрямую перенесена из сотовых сетей в Wi-Fi из-за различия в протоколах физических уровней. В работе [7] представлен прототип устройства Wi-Fi с поддержкой NOMA в нисходящем канале и экспериментально продемонстрировано повышение пропускной способности сети при использовании данной технологии. На данный момент UL-NOMA в сетях Wi-Fi изучена только с использованием методов имитационного и аналитического моделирования, но нет экспериментальных исследований. В работе [8] описан общий принцип работы NOMA-приемника в сети Wi-Fi и построена имитационная модель приема NOMA-кадров в различных моделях канала. Результаты, полученные в работе [9] демонстрируют прирост суммарной пропускной способности устройств в сети с NOMA приблизительно в два раза по сравнению с существующими способами передачи данных в Wi-Fi.

Не смотря на широкую изученность UL-NOMA с помощью аналитических и имитационных методов, авторами не были найдены работы, посвященные экспериментальному исследованию данной технологии в сетях Wi-Fi. Кроме того, для оценки эффективности технологии UL-NOMA не достаточно основываться только на результаты теоретических исследований, поскольку в них, как правило, используется ряд допущений, которые являются критичными при реализации в устройствах. Например, часто оценка помехи от сигнала с меньшей мощностью представляется в виде аддитивного белого гауссовского шума. В данной работе впервые представлен прототип

NOMA-приемника, способный одновременно принимать два кадра, разделенных по мощностям, и поддерживающий совместимость с устройствами прошлых поколений.

3 Структура вложенного кадра

Рассмотрим подробнее изменения в структуре вложенного кадра. Основная станция посылает кадры, совместимые со стандартом IEEE 802.11a. При приеме NOMA-кадра необходимо производить независимую оценку каналов основного и вложенного кадров, а также правильно производить корректировку фазы по пилотным поднесущим в OFDM-символах. Для реализации этих функций необходимо разработать модифицированную структуру вложенного кадра.

Для независимой оценки каналов двух станций в UL-NOMA можно применить подход, использующийся в восходящем канале MU-MIMO, который заключается в разделении сигналов, использующихся для оценки канала на каждом устройстве [10]. Для этого предлагается изменить сигнал в поле L-LTF вложенного кадра, чтобы добиться ортогональности с сигналом, передаваемым в поле L-LTF основного кадра.

На рис. 2 изображены поля L-LTF основного и вложенного кадров. В поле L-LTF стандартной преамбулы передаются две одинаковые последовательности на местах LTF-1 и LTF-2 длительностью 3,2 мкс каждая вместе с общим двойным циклическим префиксом GI2 длительностью 1,6 мкс. Во вложенном кадре последовательность в поле LTF-2 остается неизменной, а в поле LTF-1 передается инвертированная последовательность. Также перед каждой последовательностью в полях LTF-1 и LTF-2 находится соответствующий циклический префикс длительностью 0,8 мкс, как в обычном OFDM-символе. Чтобы сигналы в поле LTF-1 вложенного и основного кадра оставались противоположны друг другу после преобразования Фурье на приемнике, каждая поднесущая сигнала в поле LTF-1 домножается на дополнительную фазу φ , которая зависит от разности Δf частот между несущей и поднесущей, которая определяется выражением (1). Это необходимо, так как сигналы в полях LTF-1 и LTF-2 сдвинуты друг относительно друга во временной области на время $T = 4$ мкс.

$$\varphi = e^{-j2\pi\Delta f T} \quad (1)$$

При обработке NOMA-кадра необходимо правильно оценивать набег фазы во время приема, из-за которого происходит поворот сигнального созвездия вложенного и основного кадров. Для корректировки фазы в кадрах Wi-Fi внутри OFDM-символов существуют пилотные сигналы. Однако, при одновременном приеме двух кадров происходит пересечение пилотных сигналов во времени и частоте, что ухудшает декодирование обоих кадров. Для снижения этого эффекта предлагается прореживание пилотных поднесущих

на приемнике в частотной области y_1, y_2 в LTF-1 и LTF-2 соответственно, где h_{prim}, h_{sec} — характеристики каналов между точкой доступа и основной станцией, а также точкой доступа и NOMA-станцией, LTF — известная последовательность, φ — дополнительная фаза на сигнале в LTF-1, определенная в выражении (1), n_1, n_2 — шум в канале.

$$y_1 = h_{prim} \cdot LTF \cdot \varphi - h_{sec} \cdot LTF \cdot \varphi + n_1 \quad (2)$$

$$y_2 = h_{prim} \cdot LTF + h_{sec} \cdot LTF + n_2 \quad (3)$$

Из этих уравнений получаются выражения для оценки каналов $\hat{h}_{prim}, \hat{h}_{sec}$ основного и вложенного кадров (4), (5).

$$\hat{h}_{prim} = \frac{y_2 + y_1 \cdot \varphi^{-1}}{2 \cdot LTF} \quad (4)$$

$$\hat{h}_{sec} = \frac{y_2 - y_1 \cdot \varphi^{-1}}{2 \cdot LTF} \quad (5)$$

4.2 Корректировка фазы по пилотным поднесущим

На рис. 4 изображены сигналы на пилотных поднесущих в IQ-области, стрелками показаны сигналы на OFDM-символах с наложением пилотных сигналов и с прореживанием по пилотным поднесущим вложенного кадра. Для правильной корректировки фазы и дальнейшего выделения сигнального созвездия основного кадра из вложенного, необходимо учитывать наложение пилотных сигналов в нечетных OFDM-символах. Для этого из суперпозиции пилотных сигналов предварительно вычитаются сигналы из предыдущего OFDM-символа с прореживанием, пренебрегая набегом фазы между двумя соседними символами. Таким образом, удастся выделить пилотные сигналы только вложенного кадра. Для оценки фазы на следующем символе используются значения на пилотных поднесущих предыдущего символа. Такой метод корректировки фазы используется и для вложенного, и для основного кадров.

4.3 Метод параллельного подавления помех

Для обработки сигнала меньшей мощности используется метод РСД. После домножения всего NOMA-кадра на канал \hat{h}_{sec} и корректировки фазы по пилотным поднесущим вложенного кадра, необходимо выделить сигнальное созвездие основного кадра. Для этого исходный сигнал вложенного кадра определяется с помощью принятия жесткого решения о переданной последовательности бит. В зависимости от используемой модуляции во вложенном кадре, IQ-область делится на квадратные участки одинакового размера, задающие область определения для каждой битовой последовательности. Если сигнальная точка попадает в определенную клетку, то исходная точка

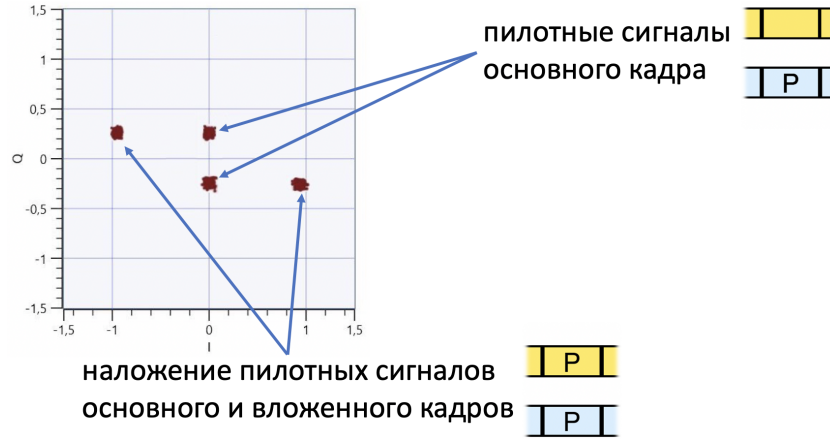


Рис. 4: Сигнал на пилотных поднесущих при приеме NOMA-кадра.

вложенного кадра при передаче находится в центре этой клетки. Сигнальные точки вложенного кадра, определенный таким образом, вычитаются из общего сигнала, и таким образом происходит сдвиг сигнального созвездия основного кадра в центр IQ-области.

После выделения сигнального созвездия основного кадра из вложенного необходимо домножить сигнал на канал \hat{h}_{prim} предварительно разделив его на \hat{h}_{sec} на который до этого домножается весь NOMA-сигнал. Выражения (6)–(8) описывают, как находятся сигналы x_{sec}, x_{prim} вложенного и основного кадров из их суперпозиции y , приходящей на приемник, через \tilde{x} обозначен сигнал, полученный вышеизложенным методом. Далее кадры обрабатываются параллельно.

$$y = h_{sec} \cdot x_{sec} + h_{prim} \cdot x_{prim} + n \quad (6)$$

$$x_{sec} = y \cdot \hat{h}_{sec}^{-1} \quad (7)$$

$$x_{prim} = (y \cdot \hat{h}_{sec}^{-1} - \tilde{x}) \cdot \hat{h}_{sec} \cdot \hat{h}_{prim}^{-1} \quad (8)$$

5 Результаты эксперимента

С помощью разработанного прототипа проведено экспериментальное исследование влияния разности мощностей на способность приемника успешно декодировать кадры от основной станции и от NOMA-станции. В качестве приемопередатчиков используются две программно-определяемых радиосистемы NI USRP-2944R [12]: одна — в режиме передатчика, другая — в режиме приемника. С передатчика отправляются два сигнала одинаковой длительности 800 мкс с двух антенн на разных мощностях. Для основного кадра используется сигнально-кодовая конструкция (англ.: Modulation

and Coding Scheme, MCS) порядка 2 и 3. Для вложенного кадра — MCS 2, MCS 4. Более мощный сигнал соответствует кадру NOMA-станции и имеет модифицированную преамбулу и прореживание по пилотным поднесущим. Слабый сигнал соответствует сигналу основной станции и имеет вид, определенный в стандарте IEEE 802.11a [13]. Сигналы передаются на частоте 5,32 ГГц, ширина канала 20 МГц. Параметры эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры эксперимента.

Частота несущей	5,32 ГГц
Ширина канала	20 МГц
MCS, основной кадр	MCS 2, MCS 3
MCS, вложенный кадр	MCS 2, MCS 4
Длительность кадра	800 мкс

В экспериментах измеряется отношение количества успешно декодированных кадров к количеству всех отправленных кадров (англ.: Frame Recieve Ratio, FRR) в зависимости от отношения мощностей вложенного кадра к мощности основного кадра и шума (англ. Signal Interference + Noise Ratio, SINR). Измерения проводятся при фиксированном отношении сигнал/шум (англ.: Signal-to-Noise Ratio, SNR) основного кадра. Значения SNR выбираются из условия, что при использовании конкретной MCS стандартные кадры принимаются успешно с вероятностью близкой к 100%, а при переключении на MCS более высокого порядка заметно уменьшение этой вероятности. Рис. 5 демонстрирует сигнальные созвездия вложенного и основного кадра для значения $\text{SINR} = 6$ дБ, оба кадра передаются с использованием квадратурной фазовой манипуляции (англ. Quadrature Phase Shift Keying, QPSK).

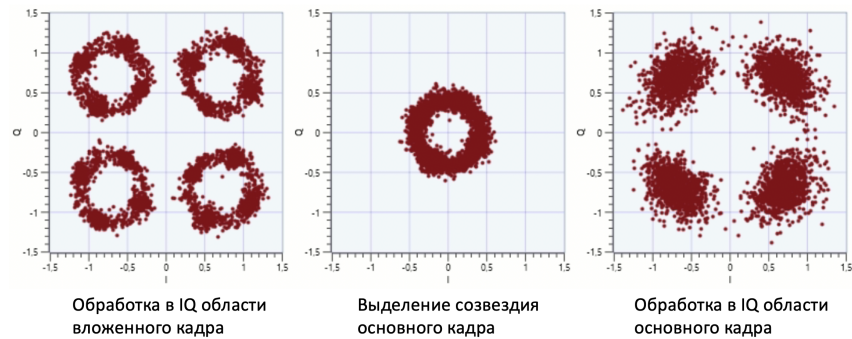


Рис. 5: Сигнальные созвездия вложенного и основного кадров при $\text{SINR} = 6$ дБ.

В первом эксперименте при передаче без вложенного кадра SNR основного кадра на приемнике 10,5 дБ. Основной кадр передавался на MCS 2. На рис. 6 изображена зависимость FRR для основных и вложенных кадров от SINR вложенного кадра.

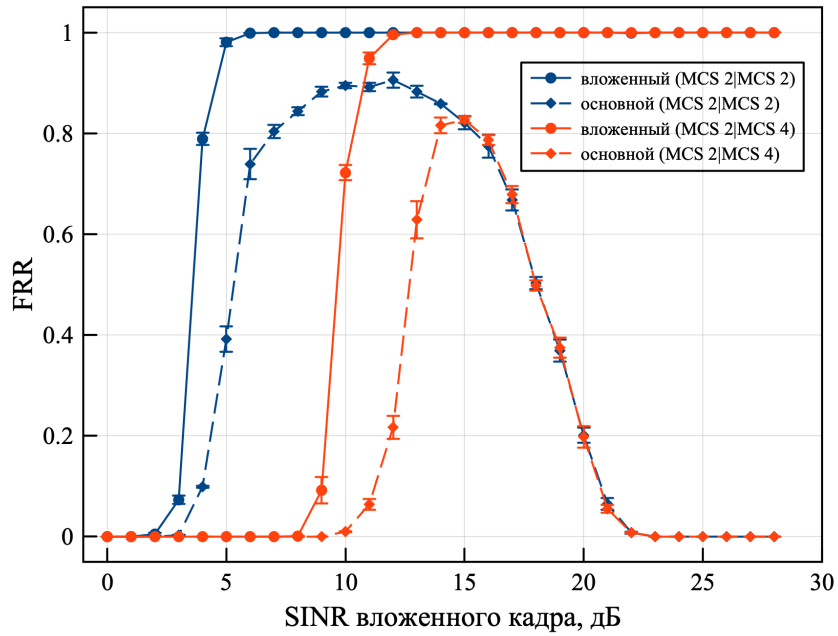


Рис. 6: Прием NOMA-кадра при использовании MCS 2 для основного кадра.

Во втором эксперименте при передаче без вложенного кадра SNR основного кадра на приемнике 13,5 дБ. Основной кадр передавался на MCS 3. На рис. 7 изображена зависимость FRR для основных и вложенных кадров от SINR вложенного кадра.

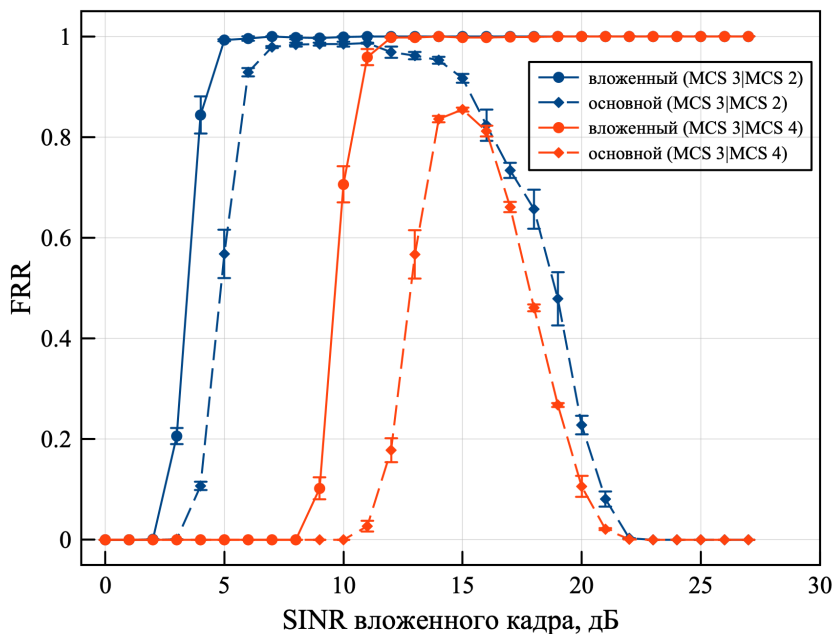


Рис. 7: Прием NOMA-кадра при использовании MCS 3 для основного кадра.

В обоих экспериментах для передачи основного кадра используется QPSK. Для $SNR = 13,5$ дБ, и комбинации (MCS 3 | MCS 2) существует область при значениях SINR от 7 дБ до 11 дБ, когда вероятность приема обоих кадров близка к 100%. Для остальных комбинаций MCS при данных условиях эксперимента вероятность приема основного кадра оказывается меньше 100%.

На графиках видно ухудшение приема вложенного и основного кадра при приближении SINR к значению 4–6 дБ при использовании MCS 2 для передачи вложенного кадра и к значению 9–13 дБ — при MCS 4. При близких мощностях кадров происходит пересечение соседних сигнальных созвездий, что делает невозможным декодирование и основного, и вложенного кадра. Из-за малой разности мощностей точки сигнального созвездия основного кадра могут попадать в соседнюю клетку при жестком решении, соответственно неверно производится выделение основного кадра из вложенного.

Вложенный кадр принимается лучше, чем основной кадр, за счет исправления ошибок при помехоустойчивом кодировании.

При увеличении значения SINR пересечения сигнальных созвездий не происходит, что позволяет успешно принимать вложенный кадр большей мощности с вероятностью близкой к единице. Также это позволяет правильно выделять сигнальное созвездие основного кадра.

При дальнейшем увеличении мощности наблюдается спад вероятности успешного приема основного кадра до нуля. Это объясняется тем, что при корректировке фазы общего NOMA-кадра по прореженным поднесущим вложенного кадра возникает поворот общего сигнального созвездия на некоторую фазу [11]. Эта фаза практически не влияет на прием вложенного кадра, но она становится существенной во время выделения основного кадра и его дальнейшей обработке при высокой разности между кадрами.

6 Заключение

В данной работе разработана модифицированная структура вложенного кадра и представлен первый в мире прототип приемника Wi-Fi, способный принимать NOMA-кадры. С помощью прототипа проведены измерения по оценке влияния разности мощностей передачи между двумя кадрами на способность приемника декодировать кадры от основной станции и NOMA-станции.

При данной реализации существует область значений SINR вложенного кадра для успешного приема обоих кадров при комбинации (MCS 3 | MCS 2). Планируется разработать другой способ корректировки фазы по пилотным сигналам, для того, чтобы повысить вероятность приема основного кадра.

Список литературы

1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 : White Paper : Cisco, 2019. — February.
2. Khorov Evgeny, Levitsky Ilya, Akyildiz Ian F. Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7 // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 88664–88688.
3. Liu Yuanwei, Qin Zhijin, El-kashlan Maged et al. Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond. — 2017.
4. Uplink Nonorthogonal Multiple Access in 5G Systems / Ningbo Zhang, Jing Wang, Guixia Kang, Yang Liu // IEEE Communications Letters. — 2016. — Vol. 20, no. 3. — P. 458–461.
5. Uplink non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks / Mohammed Al-Imari, Pei Xiao, Muhammad Ali Imran, Rahim Tafazolli. — 2014. — P. 781–785.
6. A Universal Receiver for Uplink NOMA Systems / Xiangming Meng, Yiqun Wu, Chao Wang, Yan Chen. — 2018. — P. 117–121.
7. Prototyping and Experimental Study of Non-Orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks / Evgeny Khorov, Aleksey Kureev, Ilya Levitsky, Ian F. Akyildiz // IEEE Network. — 2020. — Vol. 34, no. 4. — P. 210–217.

8. Ghazi H.S., Wesolowski Krzysztof. Uplink NOMA scheme for wi-fi applications // International Journal of Electronics and Telecommunications. — 2018. — 01. — Vol. 64. — P. 481–485.
9. Performance Evaluation of Uplink NOMA in Wi-Fi Networks / Grigory Korolev, Aleksey Kureev, Evgeny Khorov, Dmitry Shmelkin. — 2020. — P. 1–5.
10. Flores Adriana B., Quadri Sadia, Knightly Edward W. A Scalable Multi-User Uplink for Wi-Fi. — 2016. — P. 179–191.
11. Р.А. Злобин А.А. Куреев. Экспериментальное исследование использования неполного количества пилотных поднесущих для коррекции фазы в UL-NOMA Wi-Fi // Сборник трудов конференции "Информационные Технологии и Системы (ИТиС) 2020". — 2020.
12. DEVICE SPECIFICATIONS NI USRP-2944R // National Instruments. — 2016.
13. IEEE 802.11a-1999 - IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band. — 1999.