

Экспериментальное исследование влияния вращения сигнальных созвездий при использовании неортогонального множественного доступа в сетях Wi-Fi.¹

А.А. Куреев^{*,**}, И.А. Левицкий^{*,**}, Е.М. Хоров^{*,**}

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

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

Поступила в редколлегию 11.06.2020 г.

Аннотация—Одним из способов повышения эффективности сетей Wi-Fi является использование неортогонального множественного доступа в нисходящем канале. Эта технология позволяет передавать данные сразу нескольким устройствам в одном частотно-временном ресурсе. Эффективность декодирования сигнала, переданного с помощью неортогонального множественного доступа, зависит не только от канальных условий между передающим устройством и принимающими, но и от того, каким образом будет сформирован такой сложный сигнал на передатчике. В данной работе представлена установка, способная передавать с помощью неортогонального множественного доступа сигналы Wi-Fi и позволяющая осуществлять вращение сигнальных созвездий. Показано, что поворот созвездий повышает вероятность успешного декодирования сигнала NOMA Wi-Fi.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неортогональный доступ, мультиплексирование сигналов, Wi-Fi.

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология Wi-Fi является одной из самых широко используемых технологий беспроводной связи на сегодняшний день. Одной из причин столь высокой популярности данной технологии является ее непрерывное развитие и приспособление под требования потребителей. Поэтому на сегодняшний день главными задачами разработчиков технологии Wi-Fi является повышение максимальной пропускной способности, минимизация задержек на передачу данных, а также увеличение спектральной эффективности сетей Wi-Fi. Основными способами решения заявленных выше задач является расширение частотного канала и увеличение количества антенн на устройствах для поддержания многоантенной передачи (англ.: Multiple Input Multiple Output, MIMO) более высокого порядка. Однако, обычно в сетях Wi-Fi встречается большое количество устройств разных поколений. В связи с этим, разработчикам новых дополнений к технологии Wi-Fi приходится балансировать между повышением эффективности работы сети и обеспечением обратной совместимости этих сетей.

Неортогональный множественный доступ (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) является потенциальным решением представленного вопроса. NOMA позволяет точке доступа (англ.: Access Point, AP) передавать потоки данных сразу нескольким пользовательским

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Правительства Российской Федерации (Договор No 14.W03.31.0019)

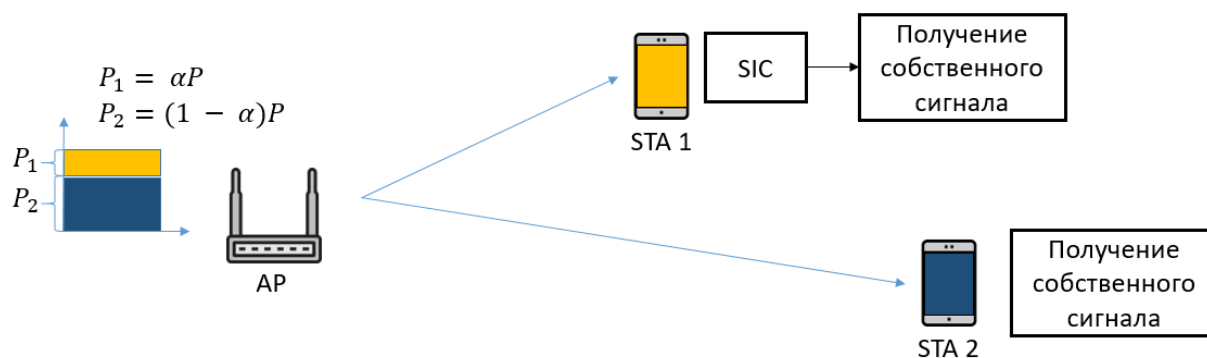


Рис. 1. Пример использования NOMA.

устройствам (англ.: Station, STA) одновременно в одном частотно-временном ресурсе и с помощью одной антенны.

Рассмотрим работу точки доступа (AP) и пары пользовательских устройств (STA 1 и STA 2), находящихся на разных расстояниях от точки доступа так, как показано на рис. 1. Расположение пользовательских устройств на разном расстоянии предполагает разное качество канала между ними и точкой доступа. Устройство, находящееся на большем удалении от точки доступа испытывает более плохие каналные условия, чем менее удалённое устройство. Точка доступа в нисходящем канале передает кадры с данными пользовательским устройствам. В случае классического Wi-Fi точка доступа вынуждена передавать кадры по очереди каждому пользовательскому устройству. В случае NOMA, точка доступа генерирует суммарный сигнал с помощью метода суперпозиционного кодирования. Основная идея этого метода заключается во взвешенном сложении сигналов, относящихся к разным кадрам для разных пользовательских устройств. Веса для сигналов выбираются в зависимости от каналных условий или дополнительно от требований трафика. Для краткости, в работе суммарный сигнал определяется как *NOMA-кадр*, сигнал, предназначенный пользовательскому устройству с лучшими каналными условиями, как *основной кадр*, а сигнал, предназначенный пользовательскому устройству с худшими каналными условиями, как *вложенный кадр*. В случае передачи данных двум пользовательским устройствам, основной кадр складывается с весом $\sqrt{1 - \alpha}$, а вложенного кадра — с весом $\sqrt{\alpha}$, где $\alpha < 0.5$ — коэффициент распределения мощности между устройствами. Если суммарная мощность излучения точки доступа P , то мощность вложенного кадра $P_1 = \alpha P$, а мощность основного кадра $P_2 = (1 - \alpha)P$.

Пользовательское устройство, которому предназначен основной кадр, принимает NOMA-кадр как обычный Wi-Fi кадр, считая вложенный кадр шумом. Пользовательское устройство, которому предназначен вложенный кадр, является NOMA-приемником и во время приема декодирует сначала основной кадр, а затем применяет метод последовательного подавления помех (англ.: Successive Interference Cancellation, SIC) для вычитания основного кадра из NOMA-кадра и декодирования вложенного кадра.

В отличие от обыкновенных передающих устройств Wi-Fi, NOMA-передатчик должен учитывать, что на практике при приеме сигнала проявляется влияние не только аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ), но и фазового шума. Причина последнего заключается в следующем. Частотные генераторы приемника и передатчика не могут быть идеально синхронизированы, и поэтому во время декодирования кадра приемник производит частотную коррекцию сигнала. Для компенсации фазы сигнала используются пилотные символы с заранее известной фазой. Однако из-за неидеальности этих этапов коррекции появляется остаточный фазовый шум в сигнале. Особенно острой данная проблема становится в том случае,

когда коэффициент распределения мощности между устройствами α достаточно мал. В таком случае фазовый шум приводит к частым ошибкам декодирования сигнала и, как следствие, снижению эффективности NOMA.

Проблема фазового шума исследовалась большим количеством научных групп. Работа [1] посвящена аналитическому исследованию фазового шума в классической системе передачи, не использующей NOMA. Построив аналитическую модель сигнала, авторы видоизменяют форму сигнального созвездия для максимизации взаимной информации между переданным и принятым сигналом. В работе [2] также рассматривают фазовый шум и строят сигнальное созвездие, устойчивое к фазовому шуму. Как и в работе [1], авторы не рассматривают NOMA.

Одним из методов, способных снизить влияние фазового шума на прием сигнала является вращение сигнальных созвездий. Работы [3–6] исследуют возможность вращения сигнальных созвездий NOMA с целью уменьшения ошибок при приёме сигнала с большей мощностью, при больших значениях α , но не учитывают влияние фазового шума и также не выполняют условие обратной совместимости, которое заключается в том, что сигнальное созвездие для основного кадра должно сохраняться. Данная работа впервые детально описывает влияние фазового шума на сложные модуляционные конструкции NOMA и предлагает простое решение для этой проблемы.

В работе представлена экспериментальная установка на базе Wi-Fi, использующая неортогональный множественный доступ для передачи данных в нисходящем канале и способная вращать сигнальные созвездия вложенного кадра. Предлагаемая установка является усовершенствованием прототипа, представленного в работах [7,8], не способного производить операцию вращения сигнального созвездия вложенного кадра.

Работа устроена следующим образом. В разделе 2 описано, как поворот сигнального созвездия снижает влияние фазового шум, а также представлена установка, позволяющая реализовать поворот сигнального созвездия. Раздел 3 описывает постановку эксперимента и полученные результаты. Раздел 4 завершает работу.

2. ВРАЩЕНИЕ СИГНАЛЬНЫХ СОЗВЕЗДИЙ

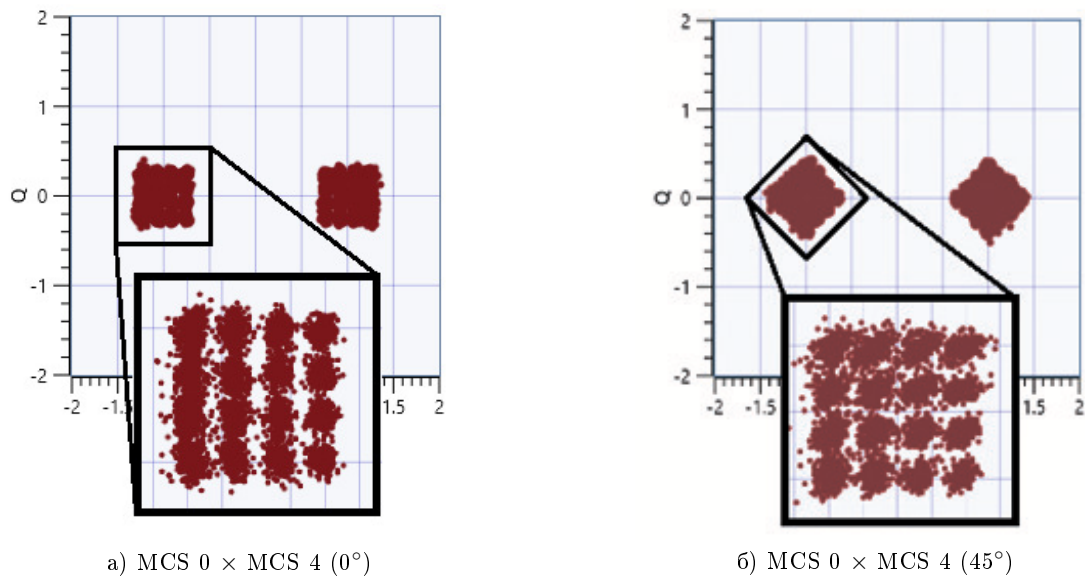


Рис. 2. Пример сигнального созвездия NOMA-кадра.

При разработке прототипа, описанного в работе [8], было обнаружено, что при определенных комбинациях сигнальных созвездий вложенного и основного кадров вклад фазового шума становится настолько существенным, что может привести к отказу от декодирования принимаемого сигнала.

Рис. 2 а) отображает пример сигнального созвездия NOMA-кадра, являющегося суперпозицией двух сигнально-кодовых конструкций (англ.: Modulation and Coding Scheme, MCS) для передачи основного и вложенного кадров в NOMA-кадре. В данном примере для передачи основного кадра используется MCS 0 с двоичной фазовой манипуляцией (англ.: binary phase-shift keying, BPSK), а для передачи вложенного кадра используется MCS 4 с 16-ти позиционной квадратурной модуляцией (англ.: 16 Quadrature Amplitude Modulation, 16-QAM). Из рис. 2 а) можно наблюдать влияние фазового шума на точки созвездия. Особенно заметно это влияние на точки с наибольшей амплитудой, испытывающие наибольшее смещение относительно идеального положения. Для отдельных точек можно сказать, что фазовый шум вносит дополнительную дисперсию вдоль определённого направления. При использовании NOMA с малым значением коэффициента распределения мощности α это направление одинаково для всех точек одного сигнального созвездия вложенного кадра. Направление зависит от положения этого созвездия, а значит характер шума вложенного сигнала зависит и от модуляции основного кадра.

В данной работе предлагается бороться с фазовым шумом с помощью поворота созвездий вложенного кадра. Негативный эффект фазового шума может быть снижен, если повернуть созвездие вложенного кадра на такой угол, при котором флуктуации, возникающие при фазовом шуме, будут реже приводить к ложному декодированию модуляционного символа. На рис. 2 б) изображен поворот сигнального созвездия вложенного кадра на 45° . При таком повороте перекрытие между различными модуляционными символами уменьшилось и, как результат, вероятность успешного декодирования сигнала повысилась. Стоит отметить, что для сохранения обратной совместимости представляется возможным вращать только сигнальное созвездие вложенного кадра без изменения сигнального созвездия основного кадра.

Для реализации поворота сигнального созвездия вложенного кадра был разработан прототип, основанный на программно-определяемом реконфигурируемом радиоустройстве (англ.: Universal Software Radio Peripheral, USRP). В работе использовалась модель NI USRP-2944R, которая оборудована двумя отдельными приёмопередатчиками, работающими в диапазоне от 10 МГц до 6 ГГц с максимальной полосой пропускания 160 МГц. USRP содержит программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), которая является эффективным инструментом для построения цифровых устройств, выполняющих передачу и прием данных на высокой скорости. Все вышеуказанные характеристики позволяют использовать USRP для прототипирования не только Wi-Fi устройств, совместимых со стандартом 802.11a, но и совместимых с более новыми стандартами, такими как 802.11ax (Wi-Fi 6).

Программирование USRP происходит в среде LabVIEW, позволяющей создавать прототипы систем беспроводной связи. Для выполнения функционала устройства Wi-Fi, на USRP выполняется программа NOMA 802.11 Application Framework. Основу программы составляет 802.11 Application Framework - упрощенная реализация протокола 802.11a с открытым исходным кодом для USRP. После внедрения изменений в базовую реализацию, разработанный прототип получил возможность работать как точка доступа, передающая NOMA-кадры, или как NOMA-приемник, получающий их. В силу мер, принятых на этапе дизайна структуры NOMA-кадра, прототип получил обратную совместимость со стандартными устройствами. Это означает, что обычные Wi-Fi устройства могут получать основные кадры, передаваемые прототипом.

Для формирования NOMA-кадра в прототипе реализован модифицированный метод суперпозиционного кодирования. Схема передающего тракта, отвечающего за суперпозиционное ко-

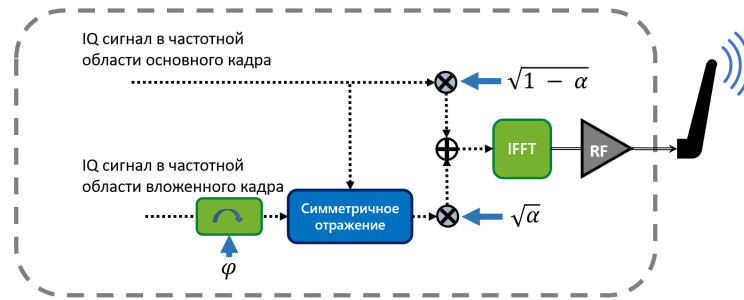


Рис. 3. Схема передающего тракта, отвечающего за суперпозиционное кодирование

дирование изображена на рис. 3. Синфазная и квадратурная (англ.: In-phase and Quadrature, IQ) составляющие сигнала основного и вложенного кадра в частотной области подаются на вход в блок IQ обработки. Перед этим, IQ сигнал вложенного кадра проходит через блок симметричного отражения. С его помощью биты присваиваются точкам сложного созвездия в соответствии с кодом Грея, что повышает надёжность передачи вложенного кадра. Далее оба IQ сигнала от вложенного кадра и основного кадра домножаются на весовые коэффициенты $\sqrt{\alpha}$ и $\sqrt{1-\alpha}$ соответственно.

Главная особенность разработанного метода — операция поворота сигнала вложенного кадра перед симметричным отражением. Стоит отметить, что разработанная установка позволяет поворачивать сигнальное созвездие на произвольный угол, но на практике использовался только фиксированный набор углов для всех комбинаций созвездий, чтобы не передавать информацию об угле поворота внутри кадра, не добавляя тем самым дополнительные поля в преамбулу Wi-Fi кадра. В набор были включены углы 0° и 45° . Поворот на 45° был реализован, поскольку он позволяет максимизировать расстояние между точками созвездий вдоль направления фазового шума для определенных комбинаций.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью разработанного прототипа проведено экспериментальное исследование влияния фазового шума на декодирование вложенного кадра при различных углах ϕ поворота сигнального созвездия вложенного кадра. Для этого прототип использовался в режиме *loopback*, где два приемопередатчика USRP были соединены с помощью коаксиального кабеля длиной 0.5 м. В рамках эксперимента, один из приемопередатчиков USRP выступал в качестве NOMA-передатчика, в то время как другой приемопередатчик выступал в качестве NOMA-приемника. USRP осуществляло передачу NOMA-кадров в частотной полосе 20 МГц и на частоте несущей 2.473 ГГц. Для обеспечения работы на границе отказа от декодирования вложенного кадра были использованы аттенюаторы. В результате мощность приема NOMA-кадра составила – 69 дБм, в то время как отношение сигнал/шум (англ.: Signal-to-noise ratio, SNR) составляет 26.5 дБ. Такое значение SNR позволяет принимать основной кадр с вероятностью, близкой к единице.

Варьирование α в пределах от 0 до 0.5 обеспечивает разделение мощности передачи между основным кадром и вложенным кадром. Поэтому, при варьировании α изменяется SNR для вложенного кадра. Для каждого SNR и различных комбинаций MCS было получено отношение количества успешно декодированных вложенных кадров ко всем отправленным вложенным кадрам (англ.: frame receive ratio, FRR). Были рассмотрены MCS 0, MCS 2, MCS 4, использующие одинаковую кодовую скорость, равную 1/2. Таким образом, при сравнении FRR значение имеет только общая структура сложного сигнального созвездия, а не скорости кода.

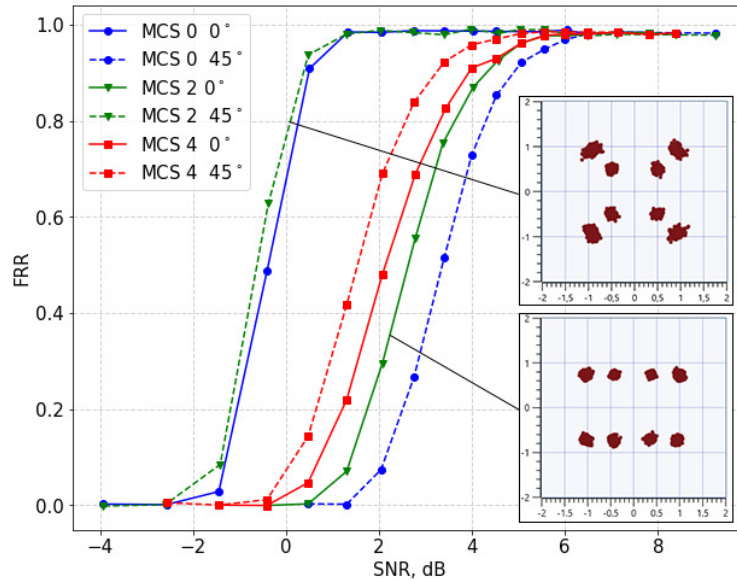


Рис. 4. Зависимость FRR от SNR для вложенных кадров, переданных с помощью MCS 0.

Измерение FRR происходит для каждой комбинации MCS и угла поворота созвездия $\phi = 0^\circ$ и $\phi = 45^\circ$.

Результаты экспериментов изображены на рис. 4, 5 и 6. Рис. 4 изображает зависимость FRR от SNR для вложенных кадров, отправленных на MCS 0, использующей BPSK. При использовании BPSK для основного кадра поворот на 45° только ухудшает декодирование сигнала, в то время как при использовании созвездий больших порядков, таких как QPSK и 16-QAM доля успешно декодированных вложенных кадров возрастает и выигрыш в SNR достигает 4 дБ. Такой большой прирост обусловлен тем, что угол 45° является оптимальным для данной комбинации MCS, так как точки BPSK созвездия лежат на оси, перпендикулярной направлению фазового шума.

Зависимость FRR от SNR для вложенных кадров, отправленных на MCS 2 изображена на рис. 5. В данном случае при использовании основным кадром MCS 0 поворот на 45° дает выигрыш в 1 дБ. Для MCS 4 поворот созвездия не приносит никакой пользы, в то время как для MCS 2 при повороте качество декодирования сигнала падает.

На рис. 6 изображена зависимость FRR от SNR для вложенных кадров, отправленных на MCS 4. Если передатчик использовал MCS 0 для передачи основного кадра, выигрыш от поворота на 45° будет достигать 1.5 дБ. Падения кривых же объясняются перекрытием сигнальных созвездий вложенного кадра из-за высокого значения коэффициента распределения мощности между устройствами α .

Полученные результаты показывают, что поворот сигнального созвездия на 45° может как повысить вероятность успешного декодирования вложенного кадра, так и снизить ее. В соответствии с полученными результатами, можно правильно настроить поворот вложенного созвездия при малом значении α так, чтобы максимизировать устойчивость NOMA-сигнала к фазовому шуму.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен прототип установки NOMA Wi-Fi, способный вращать сигнальные созвездия вложенных кадров. При помощи прототипа были проведены эксперименты по оценке прироста устойчивости NOMA-сигнала к фазовому шуму. Результаты экспериментов

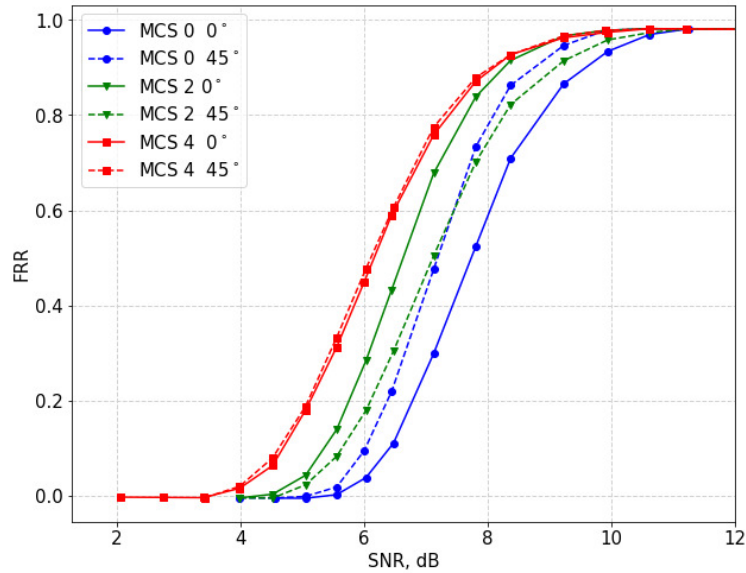


Рис. 5. Зависимость FRR от SNR для вложенных кадров, переданных с помощью MCS 2.

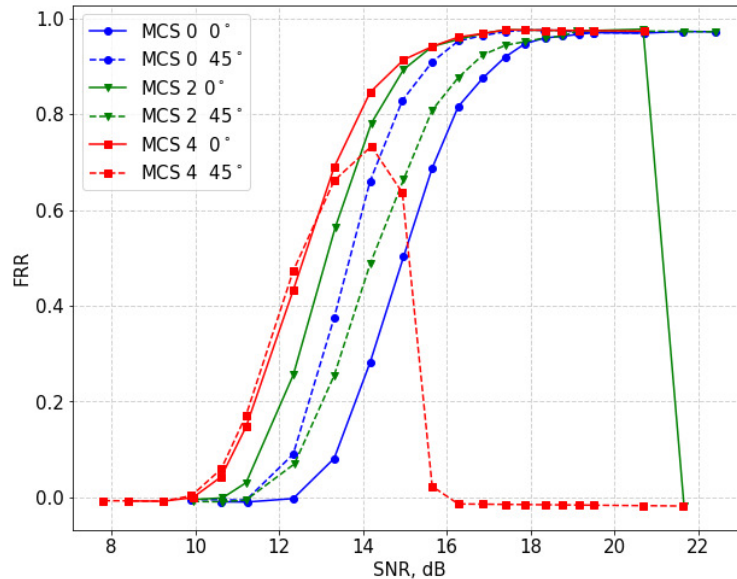


Рис. 6. Зависимость FRR от SNR для вложенных кадров, переданных с помощью MCS 4.

показывают, что поворот сигнального созвездия на 45° при использовании вложенным кадром модуляции более высокого порядка, чем BPSK, а основным кадром модуляции BPSK позволяет увеличить вероятность декодирования вложенного сигнала и повысить устойчивость к помехам почти на 4 дБ. Полученный результат особенно важен при обслуживании устройств, находящихся на границе зоны радиовидимости точки доступа. Таким образом, обслуживая устройства на минимально возможной сигнально-кодовой конструкции точка доступа приобретает возможность параллельно передавать данные устройствам с лучшими канальными условиями на сигнально-кодовых конструкциях более высоких порядков.

В данной работе для любой комбинации сигнальных созвездий исследовалось влияние поворота только на 45° . Результаты показывают, что такой поворот может повысить устойчивость к фазовому шуму, но величина выигрыша при повороте зависит от выбранной комбинации

сигнальных созвездий NOMA-кадра. В дальнейшей работе будет исследоваться вопрос целесообразности поворота на 45° . Возникает задача определения оптимального угла поворота сигнальных созвездий вложенных кадров, которую можно решить, например, основываясь на максимизации взаимной информации между переданным и принятым сигналом. Будущее исследование влияния вращения сигнальных созвездий будет направлено на решение этой задачи для каждой комбинации сигнальных созвездий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kayhan F., Montorsi, G. Constellation design for channels affected by phase noise. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2013, pp. 3154–3158.
2. Yang L., Xu S., Yang H. Design of circular signal constellations in the presence of phase noise. *2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. IEEE, 2008, pp. 1–8.
3. Zhang J., Wang X., Hasegawa T., Kubo T. Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Constellation Rotation. *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
4. Ye N., Wang A., Li X., Liu W., Hou X., Yu H. On Constellation Rotation of NOMA With SIC Receiver. *IEEE Communications Letters*, 2018, vol.22, no.3, pp. 514–517.
5. Qiu M., Huang Y., Yuan J. Downlink Non-Orthogonal Multiple Access Without SIC for Block Fading Channels: An Algebraic Rotation Approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, vol.18, no.8, pp. 3903–3918.
6. Zhao Y., Hu J., Ding Z., Yang K. Constellation Rotation Aided Modulation Design for the Multi-User SWIPT-NOMA. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
7. Khorov E., Kureev A., Levitsky I. NOMA Testbed on Wi-Fi. *29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2018, pp. 1153–1154.
8. Khorov E., Kureev A., Levitsky I., Akyildiz I.F. Prototyping and Experimental Study of Non-Orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks. *IEEE Network*, 2020, vol.18, no.8, pp. 12–19.

Experimental study of constellation rotation in NOMA Wi-Fi networks

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

Non-orthogonal multiple access is promising way to increase the efficiency of Wi-Fi networks in the downlink. With this technology, an access point can simultaneously transmit data to various devices using the same time-frequency resource. The decoding efficiency of a signal transmitted using non-orthogonal multiple access depends not only on the channel conditions between devices but also on the structure of the composite signal. In this paper, we present a testbed that uses a constellation rotation to decrease the influence of the phase noise and show that the constellation rotation increases the decoding probability of a NOMA Wi-Fi signal.

KEYWORDS: non-orthogonal multiple access, signal multiplexing, Wi-Fi.