

Анализ эффективности неортогонального множественного доступа в нисходящем канале в сетях Wi-Fi¹

Е.О. Ендовицкий^{*,**}, А.А. Куреев^{*,**}, И.А. Левицкий^{*,**}, С.А. Тутельян^{**},
Е.М. Хоров^{*,**}

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

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

Поступила в редколлегию 30.07.2021

Аннотация—Неортогональный множественный доступ (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) является технологией, способной повысить спектральную эффективность сетей Wi-Fi. NOMA позволяет точке доступа передавать данные сразу нескольким устройствам в одном частотно-временном ресурсе с помощью одной антенны, разделяя сигнал между устройствами по мощности. В данной работе оценивается выигрыш в средней геометрической пропускной способности сети Wi-Fi, использующей NOMA, по сравнению с использованием метода доступа к каналу с разделением во времени. Для этого была разработана имитационная модель сети Wi-Fi, использующей NOMA, которая была откалибрована при помощи экспериментальной установки. Результаты показывают, что использование NOMA обеспечивает увеличение средней геометрической пропускной способности до 40%.

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

DOI: 10.53921/18195822_2021_21_3_174

1. ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом увеличивается количество устройств, подключенных к сетям Wi-Fi. Это приводит к уплотнению сетей Wi-Fi, росту интерференции между соседними точками доступа, а также наличию большого количества устройств, принадлежащим к разным поколениям технологии Wi-Fi и подключенных к одной точке доступа. Поэтому все более важной становится задача увеличения пропускной способности современных сетей Wi-Fi. Решать данную задачу можно несколькими способами. Одним способом является увеличение пропускной способности за счет увеличения ширины полосы и количества антенн. По такому пути сейчас идет рабочая группа 802.11 комитета по стандартизации IEEE, разрабатывающая дополнение к стандарту IEEE 802.11be, известное также как Wi-Fi 7 [1]. По сравнению с Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), обеспечивающего скорость передачи до 9,6 Гбит/с, Wi-Fi 7 позволит достичь скорости передачи в 4 раза больше — выше 40 Гбит/с за счет использования ширины полосы до 320 МГц вместо 160 МГц и использования большего количества антенн для многоантенной передачи (16 антенн вместо 8).

Другим способом является использование методов множественного доступа, рассчитанных на повышение эффективности при многопользовательской передаче в сценариях, когда к одной сети Wi-Fi могут быть подключены устройства, принадлежащие разным поколениям технологии Wi-Fi. Одним из таких методов является неортогональный множественный доступ (англ.:

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда №21-19-00846, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00846/>

Non-orthogonal Multiple Access, NOMA). С помощью NOMA одна точка доступа (англ.: Access Point, AP) может передавать данные в нисходящем канале сразу нескольким станциям (англ.: Station, STA) одновременно с помощью одной антенны и в одном частотном канале. Это достигается за счет разделения мощности передачи между одновременными сигналами, предназначенными разным станциям. Например, при необходимости осуществить передачу двум станциям, которые находятся на разных расстояниях от точки доступа и испытывают разные затухания в канале, точка доступа будет выделять больше мощности для передачи данных станции с сильным затуханием в канале и меньше мощности станции со слабым затуханием в канале.

Исследованию NOMA посвящено большое количество работ, наиболее известными являются работы [2–5]. В данных работах математическими методами и с помощью имитационного моделирования показывается, что использование NOMA в нисходящем канале может повысить эффективность беспроводной сети в сценариях, где устройства имеют различные каналные условия.

Недостатком теоретических работ является использование допущений, которые могут значительно повлиять на производительность системы передачи данных. Во многих работах, таких как [3, 6–8] авторы не различают интерференцию от аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) и от сигнала для другой станции. Поскольку интерферирующий сигнал имеет отличную от АБГШ структуру, он иначе влияет на прием полезного сигнала предназначенной станцией. Вместо этого пропускная способность системы оценивается с помощью формулы Шеннона [9]. Такой подход используется в большей части работ при рассмотрении обобщенной абстрактной системы связи, не учитывающей особенностей современных стандартных технологий, таких как тип модуляции сигнала и помехоустойчивые коды.

Лишь немногие работы, такие как [10, 11], посвящены использованию NOMA в сетях Wi-Fi. Однако они предлагают вносить значительные изменения в стандарт, что нарушает обратную совместимость NOMA в Wi-Fi с существующими на рынке устройствами. Например, в работе [10] авторы вносят изменения в метод Request-to-Send/Clear-to-Send (RTS/CTS) для организации NOMA-передачи, в то время как работа [11] предлагает использовать р-настойчивый метод множественного доступа с прослушиванием несущей (англ.: Carrier Sense Multiple Access, CSMA) совместно с NOMA. Работа [12] предлагает использовать алгоритмы планирования ресурсов для передачи данных в нисходящем канале. Первой работой, предлагающей обратно-совместимый механизм использования NOMA в нисходящем канале Wi-Fi, является работа [13]. В данной работе был разработан первый в мире прототип приемо-передающего устройства Wi-Fi, использующего NOMA. С помощью разработанного устройства были получены зависимости доли потерянных кадров на приемнике от параметров передачи кадров Wi-Fi в режиме NOMA, таких как отношение сигнал/шум (англ. Signal to Noise Ratio, SNR) и отношение распределения мощностей между сигналами, предназначенными разным станциям. Более того, в данной работе представлен механизм доступа к каналу, совместимый с существующими в сетях Wi-Fi механизмами доступа к каналу [14], и показано, что использование NOMA позволяет повысить среднюю геометрическую пропускную способность на 37%.

Однако в данной работе исследование прироста производительности сети Wi-Fi, использующей NOMA в нисходящем канале, было проведено лишь при небольшом числе расположений двух станций, испытывающих разное затухание в канале. В связи с этим остается открытым вопрос, при каких соотношениях между затуханием в канале для двух станций наблюдается прирост средней геометрической пропускной способности, и какой именно выигрыш дает использование NOMA при этих соотношениях по сравнению с множественным доступом к каналу с разделением во времени.

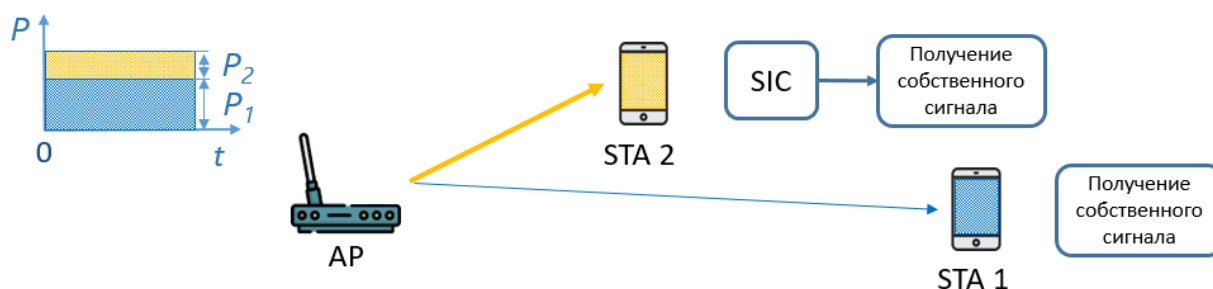


Рис. 1. Сценарий использования NOMA в беспроводной сети Wi-Fi.

Ответу на этот вопрос посвящена данная работа. Для этого была разработана имитационная платформа, которая была откалибрована с помощью экспериментальной установки, представленной в работе [15] и являющейся улучшением установки, описанной в работе [13]. На основе проведенных измерений была создана модель ошибок, которая была интегрирована в среду имитационного моделирования ns-3 [16].

Работа устроена следующим образом. В разделе 2 представлен рассматриваемый сценарий, а также описывается, как именно точка доступа передает данные станциям. Раздел 3 посвящен описанию разработанной модели ошибок, которая была интегрирована в платформу имитационного моделирования ns-3 для анализа эффективности NOMA в нисходящем канале. В разделе 4 представлены численные результаты. В разделе 5 подведен итог работы.

2. ОПИСАНИЕ СЦЕНАРИЯ

Рассмотрим сценарий с беспроводной сетью Wi-Fi, в которой имеется точка доступа AP и две пользовательские станции STA1 и STA2, причем и точка доступа, и станции являются одно-антенными. Станции находятся на разном расстоянии от точки доступа и испытывают разные затухания в канале. Пусть STA1 находится дальше и испытывает большее затухание в канале по сравнению со STA2. При использовании NOMA AP передает станциям *NOMA-кадр*, состоящий из *основного* кадра, предназначенного STA1, и *вложенного* кадра, предназначенного STA2. Иллюстрация данного сценария приведена на рис. 3. Вся мощность излучения AP равна P , которую AP разделяет на части P_1 и P_2 для передачи кадров STA1 и STA2, соответственно. Коэффициент распределения мощности α определим следующим образом: $P_1 = (1 - \alpha)P$, $P_2 = \alpha P$. Поскольку STA2 испытывает меньшее затухание в канале, AP должна передавать в NOMA данные для STA2 с меньшей мощностью, чем для STA1, иными словами:

$$\alpha = P_2/P \leq 0,5.$$

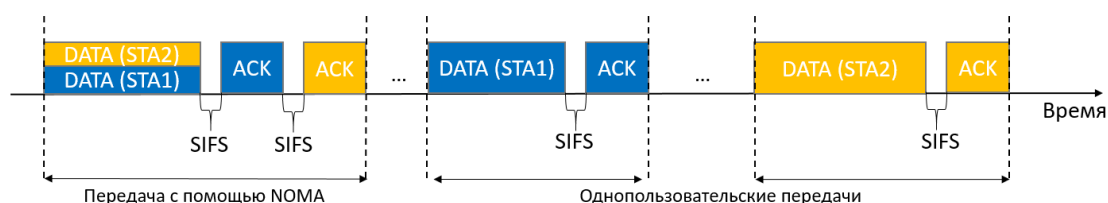


Рис. 2. Однопользовательские передачи и передачи с использованием NOMA.

В сценарии на AP генерируется насыщенный трафик, предназначенный станциям STA1 и STA2 и состоящий из кадров одинаковой длины. AP может передавать кадры либо одной из станций, либо обеим станциям одновременно, используя NOMA. На рис. 2 показаны оба возможных варианта передачи. Кадры DATA (STA1) означают передачу данных от AP к STA1, а DATA (STA2) — от AP к STA2. При использовании NOMA станции передают кадры подтверждения (англ.: Acknowledgement, ACK) подряд: сначала передает STA1, затем STA2.

AP выбирает сигнально-кодovou конструкцию (СКК) для передачи исходя из значений отношения сигнал/шум + интерференция (англ.: Signal to Interference + Noise Ratio, SINR) на приемнике так, чтобы вероятность успешного приема кадра была не меньше некоторого заданного значения p_t . В данной работе примем $p_t = 0,9$. Для этой цели строится таблица, в которой каждой СКК ставится в соответствие предельное значение SINR, при котором возможно передавать кадры на данном СКК с заданной вероятностью успеха. Пусть $SINR_1$ и $SINR_2$ определяют SINR для STA1 и STA2 соответственно, h_1 определяет коэффициент затухания в канале для STA1, h_2 определяет коэффициент затухания в канале для STA2. Тогда, принимая мощность шума за σ^2 , выразим $SINR_1$ и $SINR_2$ следующим образом:

$$SINR_1(\alpha) = \frac{(1-\alpha)P|h_1|^2}{\alpha P|h_1|^2 + \sigma^2} = \frac{(1-\alpha)SNR_1}{\alpha SNR_1 + 1}, \quad (1)$$

$$SINR_2(\alpha) = \frac{\alpha P|h_2|^2}{\sigma^2} = \alpha SNR_2, \quad (2)$$

где SNR_1 и SNR_2 определяют SNR сигнала от AP к STA1 и STA2 соответственно без использования NOMA. По выражениям (1)–(2) AP вычисляет значения SINR для данной станции и по таблице определяет множество допустимых СКК. Оценку SINR на каждой станции AP может получить либо на основе статистики переданных ранее кадров, либо же получить от каждой станции по обратной связи.

При использовании однопользовательской передачи AP выбирает самый высокий из допустимых СКК. При использовании NOMA AP может варьировать коэффициент распределения мощности α , получая различные значения SINR и, соответственно, различные множества допустимых СКК для каждой станции. В общем случае выбор конкретного значения α для передачи и, следовательно, пары СКК, может осуществляться с помощью оптимизации некоторой целевой функции U , зависящей от политики обслуживания станций. В данной работе в качестве такой политики выбрано пропорционально-честное обслуживание, целевой функцией для которой является среднее геометрическое скоростей передачи:

$$U(c_1, c_2) = \sqrt{r(c_1)r(c_2)}, \quad (3)$$

где $r(c_i)$ – скорость передачи данных станции i на СКК с индексом c_i .

При передаче с помощью NOMA решается следующая задача:

$$\max_{\{c_1, c_2\} \in C^*} U(c_1, c_2), \quad (4)$$

где C^* – множество упорядоченных допустимых пар СКК. Далее описано построение множества C^* .

Пусть выбрана некоторая пара СКК $\{c_1, c_2\}$. Из (2) следует, что $SINR_2$ зависит только от мощности, выделенной непосредственно STA2. Поэтому по таблице допустимых СКК для STA2 находится предельное значение SINR для c_2 . Используя (2), можно найти требуемую мощность передачи для STA2 P_2 . Если оказалось, что $P_2 > \frac{P}{2}$, то указанная пара СКК отбрасывается, так как коэффициент $\alpha \leq 0,5$.

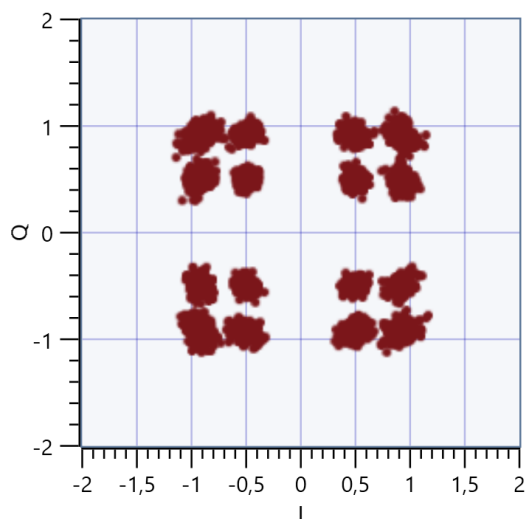


Рис. 3. Пример сигнального созвездия NOMA.

Если $P_2 \leq \frac{P}{2}$, то мощность, выделяемая для передачи основного кадра, равна $P_1 = P - P_2$. Теперь из (1) можно вычислить SINR для STA1 и далее по таблице определить, достаточно ли вычисленного SINR для передачи на СКК c_1 . Если да, то $C^* = C^* \cup \{c_1, c_2\}$, иначе пара отбрасывается.

После формирования C^* находится максимум (4), а также значения СКК и коэффициент распределения мощности, с которыми и производится передача NOMA. В рамках данной работы необходимо сравнить геометрическое среднее пропускной способности описанной выше системы, использующей NOMA, с классическим методом доступа к каналу с разделением во времени (англ.: Time Division Multiple Access, TDMA).

3. МОДЕЛЬ ОШИБОК

Далее ответим на вопрос, как именно составлять описанную в разделе 2 таблицу, определяющую пороговое значение SINR для заданного СКК. Одним из самых простых способов является использование таблиц, полученных с помощью модели ошибок NIST [17], которая уже имплементирована в ns-3. Данная модель построена в предположении, что в качестве интерференции во время приема кадров выступает аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ). Однако для передач с использованием NOMA это не является верным. Рисунок 3 показывает пример сигнального созвездия NOMA-кадра, в котором для передачи основного и вложенного кадров используется квадратурная фазовая манипуляция. На данном примере станция STA1 будет испытывать интерференцию со стороны вложенного кадра, и данная помеха будет обладать сложной структурой, отличной от АБГШ. Поэтому для моделирования NOMA в платформе имитационного моделирования необходимо разработать новую модель ошибок.

В работе используется модель ошибок для основного кадра, основанная на экспериментальных данных. Модель ошибок представляет из себя набор зависимостей доли ошибок в кадрах (англ. frame error rate, FER) от SINR из (1) при различных параметрах передачи: сигнально-кодовые конструкции основного и вложенного кадров, отношение мощностей между основным и вложенным кадром. Зависимости получены при помощи программно-конфигурируемого радио USRP-2954R. USRP оборудована двумя радиоинтерфейсами, которые используются для передачи NOMA-кадров в режиме обратной связи. Таким образом, USRP можно запрограммировать для передачи и одновременного приема потока NOMA-кадров. Структура NOMA-кадров, а также процедуры передачи и приема таких кадров описаны в работах [13, 18]. В

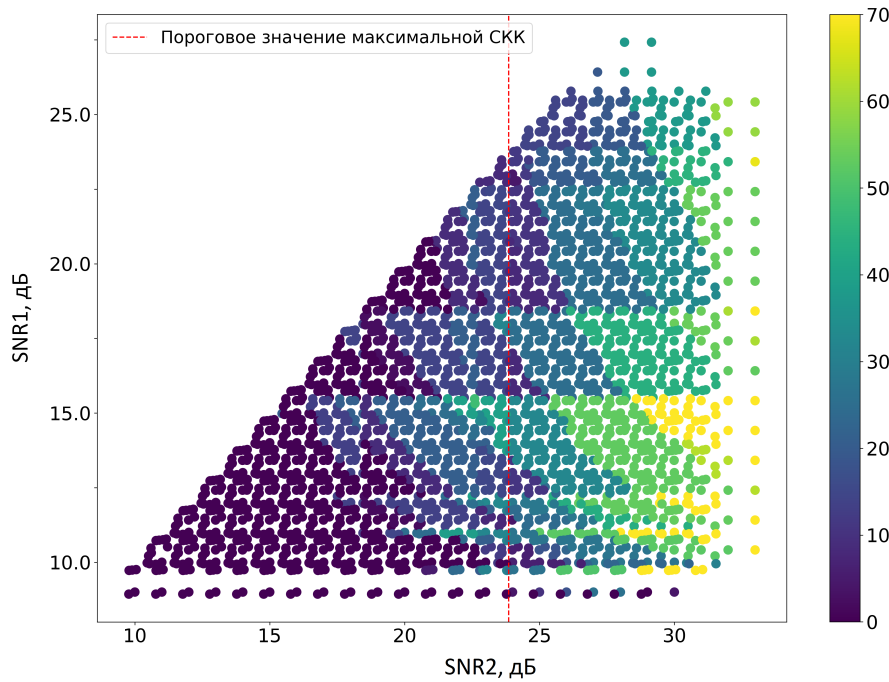


Рис. 4. Выигрыш от использования NOMA для различных SINR для STA1 и STA2.

модели ошибок предполагается плоский канал, поэтому в режиме обратной связи USRP передает кадры с одного интерфейса на другой при помощи коаксиального кабеля.

Для каждой серии экспериментов длительностью в 2 секунды определяется отношение FER для фиксированных параметров передачи и общей мощности сигнала. По результатам экспериментов были получены значения FER при всех варьируемых параметрах. Далее полученные зависимости FER загружаются в среду имитационного моделирования и используются вместо модели ошибок NIST.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование эффективности NOMA в нисходящем канале Wi-Fi производится в среде имитационного моделирования ns-3. Моделируемая сеть состоит из точки доступа AP и двух станций STA1 и STA2, согласно сценарию, описанному в разделе 2. Сценарий соответствует использованию сети Wi-Fi в офисном помещении. В каждом эксперименте использовалась новая реализация канала, статистические характеристики которого соответствуют офисному сценарию. Также в каждом эксперименте коэффициент затухания в канале для каждой станции варьируется с шагом 1 дБ.

В результате на всем множестве экспериментов SNR_1 варьируется в промежутке $[9, 27.5]$ дБ, в то время как SNR_2 варьируется в промежутке $[10, 32.5]$ дБ. Поскольку для передачи данных использовался набор СКК, при достижении $SINR = 24$ дБ устройство начинает принимать кадры с вероятностью 0,9, переданной на самой высокой для данного стандарта СКК, в котором используется модуляция 64-QAM. Таким образом, значение $SINR = 24$ дБ является пороговым значением, при превышении которого повышение относительной эффективности при использовании NOMA будет достигаться также за счет ограниченного набора СКК.

На рис. 4 отражен прирост в процентах среднего геометрического пропускной способности для различных SNR_1 и SNR_2 . Вертикальной красной пунктирной линией показано порого-

вое значение для максимального СКК. Точка с $SNR_1 = 15$ дБ и $SNR_2 = 22$ дБ соответствует экспериментальным результатам, полученным в работе [13], в котором наблюдается прирост средней геометрической пропускной способности на 37%. Полученные результаты показывают, что использовать NOMA для передачи данных в нисходящем потоке стоит в том случае, когда присутствует значительное различие в SINR для STA1 и STA2. В области значений $SNR_1 > 24$ дБ, левее красной прерывистой линии, NOMA позволяет достичь прироста средней геометрической пропускной способности до 40 %, в то время как при превышении порогового значения SINR для максимально возможной СКК (правее красной линии) использование неортогонального множественного доступа обеспечивает выигрыш до 70% в рассмотренном промежутке SNR. Однако, как было сказано ранее, выигрыш, полученный от NOMA правее красной линии завышен, поскольку при использовании TDMA у AP нет возможности использовать СКК более высоких порядков. При использовании в TDMA СКК с модуляциями выше, чем квадратурная амплитудная модуляция 64 порядка относительная эффективность NOMA будет ниже.

Несмотря на этот факт, такие сценарии тоже стоит рассматривать, поскольку в современных сетях Wi-Fi зачастую наблюдается низкая скорость присутствующих в сети устаревших устройств, способных использовать СКК меньших порядков. Поэтому NOMA позволяет решить данную проблему.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена анализу производительности неортогонального множественного доступа (англ.: Non-orthogonal Multiple Access, NOMA) в сетях Wi-Fi. С помощью разработанного прототипа была откалибрована имитационная модель NOMA Wi-Fi, позволяющая найти геометрическое среднее пропускной способности сети Wi-Fi, с использованием NOMA и с использованием разделенных во времени передач, предназначенных разным станциям. Полученные результаты показывают, что использование NOMA в нисходящем канале позволяет повысить геометрическое среднее пропускной способности до 40% в случае, когда для передачи в NOMA точка доступа использует сигнально-кодовые конструкции не наивысшего порядка. При высокой мощности приема на станциях прирост средней геометрической пропускной способности при использовании NOMA может достигать и больших величин, обеспечивая выигрыш до 70%, однако данный прирост во многом вызван ограничениями в используемых сигнально-кодовых конструкциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khorov E., Levitsky I., Akyildiz I.F. Current Status and Directions of IEEE 802.11 be, the Future Wi-Fi 7. *IEEE Access. IEEE*, 2020.
2. Islam R., Avazov N., Dobre O., Kwak K. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges. *IEEE Commun. Surveys Tuts. IEEE*, 2017, pp. 721–742.
3. Saito Y., Benjebbour A., Kishiyama Y., Nakamura T. System-Level Performance Evaluation of Down-link Non-orthogonal Multiple Access (NOMA). *2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications: Fundamentals and PHY Track. IEEE*, 2013, pp. 611–615
4. Otao N., Kishiyama Y., Higuchi K. Performance of non-orthogonal access with SIC in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation. *2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. IEEE, 2012, pp. 476–480.
5. Benjebbour A. Li A., Saito K. Saito Y., Kishiyama Y., Nakamura T. NOMA: From concept to standardization *2015 IEEE conference on standards for communications and networking (CSCN)*, 2015, pp. 18–23.

6. Saito K., Benjebbour A., Harada A., Kishiyama Y., Nakamura T. Link-level performance of downlink NOMA with SIC receiver considering error vector magnitude. *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2015, pp. 1–5.
7. Benjebbour A., Saito Y., Kishiyama Y., Yoshihisa L., Harada A., Nakamura T. Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access. *2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, 2013, pp. 770–774.
8. Saito Y., Kishiyama Y., Benjebbour A., Yoshihisa L., Nakamura T., Li A., Higuchi K. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013, pp. 1–5.
9. Shannon C. Communication in the presence of noise *Proceedings of the IRE*, 1949, pp. 10–21.
10. Shin K., Jo O. Joint scheduling and power allocation using non-orthogonal multiple access in directional beam-based WLAN systems *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, pp. 482–285.
11. Uddin M.F. Throughput performance of NOMA in WLANs with a CSMA MAC protocol *Wireless Networks*, 2019, pp. 3365–3384.
12. Khorov, E., Kureev, A., Levitsky, I., Tutelian, S. (2018, October). Scheduling for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks. In *2018 International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC)*, 2018, pp. 1–6.
13. 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.
14. *IEEE 802.11-2020 - 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*, 2020.
15. Khorov, E., Kureev, A., Levitsky, I., Akyildiz, I. F. Prototyping NOMA Constellation Rotation in Wi-Fi. In *IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2020 ,pp.1332–1333.
16. The ns-3 network simulator. <http://www.nsnam.org/>
17. Patidar R., Roy S., Henderson T. R., Chandramohan, A. Link-to-system mapping for ns-3 Wi-Fi OFDM error models. In *Proceedings of the Workshop on ns-3*. 2017, pp. 31–38.
18. 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.

Performance Evaluation of Downlink Non-orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks

E.O. Endovitskiy, E.M. Khorov, A.A. Kureev, I.A. Levitsky, S.A. Tutelian

Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) is a technology that can improve the spectral efficiency of Wi-Fi networks in a downlink. NOMA allows data transmission to several devices simultaneously in one time-frequency resource. In this paper, we investigate the geometric mean throughput gain of a Wi-Fi network using NOMA over the classical time-division multiple access method. For this, we develop a simulation model of a Wi-Fi network using NOMA, which is calibrated using a previously developed experimental setup. The results show that the use of NOMA can increase the geometric mean throughput up to 40%.

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