

Анализ производительности неортогонального множественного доступа в восходящем канале с резервирующими сигналами в сетях Wi-Fi¹

Королев Г.С.^{*,**}, Куреев А.А.^{*,**}, Ляхов А.И.^{*,**}, Хоров Е.М.^{*,**}

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

*** Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва*

Поступила в редколлегию 11.05.2022.

Аннотация—Неортогональный множественный доступ в восходящем канале (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) является многообещающей технологией, способной повысить спектральную эффективность и пропускную способность сетей Wi-Fi. Применение NOMA в восходящем канале (UL NOMA) дает возможность нескольким станциям передавать данные на точку доступа в одном частотно-временном ресурсе. В данной работе разработана аналитическая модель, позволяющая с высокой точностью оценить производительность UL NOMA при различных параметрах сети Wi-Fi.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Wi-Fi, неортогональный множественный доступ, NOMA, восходящий канал

DOI: 10.53921/18195822_2022_22_3_129

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день Wi-Fi является одной из самых популярных технологий беспроводной передачи данных [1]. Во многом это связано с простотой развертывания сети, низкой стоимостью оборудования, а также высокой скоростью передачи данных. Из-за повсеместного использования Wi-Fi происходит уплотнение сетей и повышение количества пользователей, что в свою очередь приводит к необходимости разработки решений, направленных на увеличение пропускной способности и спектральной эффективности сетей Wi-Fi. Использование многоантенных передач (англ.: Multiple Input Multiple Output, MIMO) способно решить вышеописанные задачи, но из-за наличия устройств разных поколений в сети у данной технологии возникают сложности с обратной совместимостью. Поэтому необходимо разработать новые технологии передачи данных для сетей Wi-Fi, способные не только повышать их эффективность, но и также обеспечивать обратную совместимость с уже существующими устройствами в сети.

Помимо использования MIMO, пропускную способность и спектральную эффективность можно повысить с помощью неортогонального множественного доступа (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA). Использование NOMA в нисходящем канале (англ.: Downlink NOMA, DL NOMA) позволяет одной точке доступа (англ.: Access Point, AP) передавать данные нескольким станциям (англ.: Station, STA) в одном частотно-временном ресурсе при помощи одной антенны. В свою очередь, использование NOMA в восходящем канале (англ.: Uplink NOMA,

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

UL NOMA) позволяет нескольким STA передавать данные на AP, на которой происходит разделение принятого сигнала по мощности.

В большинстве работ по данной тематике (см., например, [2–4]) исследуется эффективность DL NOMA, в то время как работ, посвященных UL NOMA в сетях Wi-Fi, не так много. Причина заключается в сложности аппаратной реализации [5] и организации передачи UL NOMA с учетом метода случайного доступа, который используется в Wi-Fi.

Одной из первых работ, посвященных UL NOMA в сетях Wi-Fi, является [6]. В данной работе для организации передачи с помощью UL NOMA разработан метод, основанный на группировке пользователей по состоянию канала (англ.: Channel State Sorting-Pairing Algorithm, CSS-PA) [7]. Однако данный метод не может работать совместно с механизмом случайного доступа EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access, улучшенный распределенный доступ к каналу), который является основным для сетей Wi-Fi.

В статье [8] представлен механизм передачи UL NOMA, который функционирует совместно с EDCA. Точка доступа группирует станции для передачи UL NOMA в зависимости от сигнально-кодовой конструкции (СКК). У каждой группы есть главная станция, которая находится ближе к точке доступа, чем другие. В предложенной схеме только главные станции конкурируют за канал, а остальные передают данные только в UL NOMA. Однако, такой способ ограничивает передачу остальных станций, что приводит к несправедливому потреблению ресурсов канала.

Данного недостатка лишена работа [9]. Основная идея представленного механизма использования UL NOMA заключается в совмещении EDCA с р-настойчивым методом множественного доступа с прослушиванием несущей (англ.: Carrier Sense Multiple Access, CSMA) для NOMA-передачи при успешной передаче с помощью EDCA. Однако на практике этот метод доступа пока не реализуем из-за сложности в декодировании сигнала на приемнике.

В работе [10] представлен механизм доступа к каналу в сети Wi-Fi, использующий UL NOMA совместно с резервирующими сигналами (англ.: Reservation Signal, RS) и механизмом RTS/CTS (англ.: Request-to-Send/Clear-to-Send). Разработанный механизм называется UL NOMA с RS и работает в предположении, что все станции сети используют EDCA и механизм RTS/CTS. Станция, получившая доступ к каналу и располагающаяся вдали от AP, посылает кадр RTS на AP. Остальные станции, претендующие на участие в передаче UL NOMA, посылают уникальный RS на AP вместе с кадром RTS от дальней станции. Затем точка доступа выбирает ближнюю станцию на основе полученных RS и инициирует передачу UL NOMA, посылая RS вместе с CTS для дальней станции.

Механизм UL NOMA с RS из работы [10] обладает следующими свойствами. Во-первых, он работает совместно с EDCA и не вызывает сложности в декодировании сигнала на точке доступа. Во-вторых, использование уникальных резервирующих сигналов снижает вероятность коллизии на уровне передач UL NOMA до нуля. В-третьих, результаты имитационного моделирования из [10] показывают, что механизм обладает высокой эффективностью по сравнению с EDCA.

Поэтому данная работа посвящена разработке аналитической модели сети Wi-Fi, в которой используется UL NOMA с RS, которая позволяет оценить суммарную пропускную способность станций. Проведена оценка точности аналитической модели с помощью имитационного моделирования.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В Разделе 2 содержится описание метода доступа EDCA с механизмом RTS/CTS, а также UL NOMA с RS. В разделе 3 приведено описание рассматриваемой системы. Раздел 4 содержит описание предлагаемой аналитической модели сети Wi-Fi, использующей UL NOMA с RS совместно с EDCA. В разделе 5 приведены численные результаты. Раздел 6 содержит выводы.

2. ОПИСАНИЕ EDCA И UL NOMA С RS

2.1. Описание метода EDCA с механизмом RTS/CTS

Вначале кратко опишем работу механизма EDCA вместе с механизмом RTS/CTS, который используют все станции рассматриваемой сети. При использовании EDCA станции взводят счетчик отсрочки до передачи. Его значение является случайной величиной, равномерно выбранной из диапазона $[0, CW - 1]$, где CW — размер окна отсрочки. Максимальный размер окна отсрочки $CW_{max} = 2^m CW_{min}$, где CW_{min} — минимальный размер окна отсрочки.

Станция, желающая отправить информацию на точку доступа, посылает RTS-кадр. AP отвечает CTS-кадром. Любая другая станция, получившая CTS-кадр, должна воздержаться от отправки кадров на заданное время. Время, которое должна ожидать другая станция перед попыткой доступа к каналу, записано и в RTS-кадре, и в CTS-кадре. Когда канал свободен, каждая станция уменьшает счетчик отсрочки на единицу по истечении времени пустого слота длительностью σ . Когда канал занят в случае успешной или неуспешной передачи, станции замораживают счетчик. Если несколько станций начинают передачу одновременно, возникает коллизия и кадры искажаются.

2.2. Описание метода UL NOMA с RS

Назовем станцию, которая осуществляет успешную передачу с EDCA, Primary STA, а станцию, которая передает совместно с данной передачей с помощью UL NOMA, Secondary STA.

Все Primary STA используют механизм RTS/CTS для передачи с помощью EDCA. Точка доступа изначально назначает каждой Secondary STA свой RS. Таким образом, при передаче кадра RTS от Primary STA на точку доступа другая станция понимает, что она является Secondary STA и посылает свой резервирующий сигнал RS на AP. Вместе с ответным кадром CTS для Primary STA точка доступа также посылает выбранный RS, который обрабатывается только определенной Secondary STA. Следовательно, инициируется NOMA-передача. Общая схема передачи кадров и резервирующих сигналов показана на рис. 1. Рис. 2 дает общий вид системы.



Рис. 1. Схема передаваемых кадров.

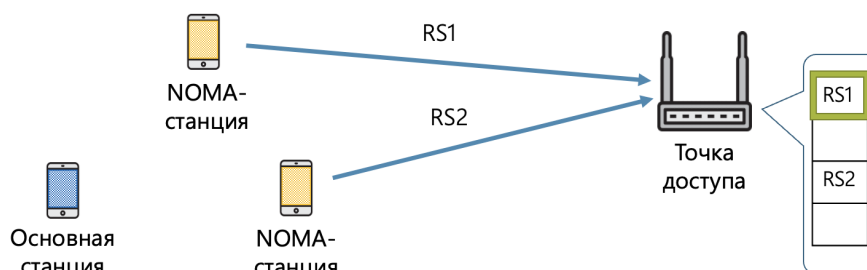


Рис. 2. Схематичное представление рассматриваемой системы.

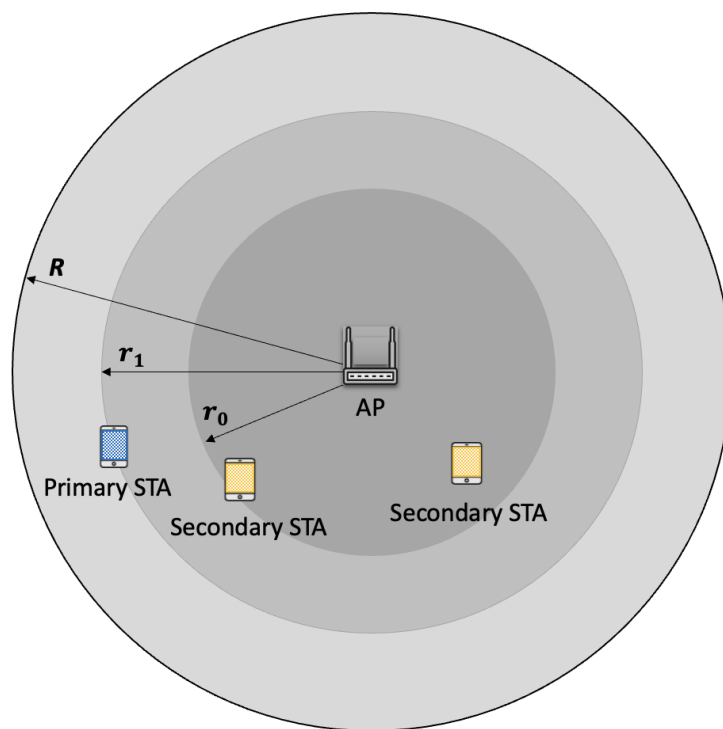


Рис. 3. Схематичное расположение станций.

В данной работе будем считать, что частотная полоса, занимаемая каждым резервирующим сигналом, равна ширине полосы минимального ресурсного блока в сетях IEEE 802.11ax [11], а именно 2,03 МГц. При увеличении ширины канала по частоте увеличивается и количество ресурсных блоков, которые позволяют составить резервирующий сигнал. В данной работе предполагается, что число резервирующих сигналов больше либо равно числу Secondary STA, т.е. RS уникален для каждой станции.

Так как точке доступа приходится выбирать Secondary STA для передачи UL NOMA, то могут использоваться разные стратегии выбора. В данной работе будем рассматривать стратегию выбора станций Max Rate (MR), при которой выбирается станция с максимальной скоростью передачи данных ω , определяемой текущей Сигнально-Кодовой Конструкцией (СКК).

3. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Рассмотрим сеть Wi-Fi, состоящую из одной AP и n станций, равномерно распределенных внутри круга радиуса R и передающих в насыщении. AP находится в центре круга. Радиус R позволяет каждой станции принимать данные, переданные с помощью наиболее надежной СКК, СКК₀, от всех остальных станций с вероятностью, близкой к 1.

На рис. 3 представлено схематичное расположение станций сети. Обозначим расстояние от AP до выбранной Secondary STA за r_0 , а до выбранной Primary STA за r_1 .

В данной работе используется модель распространения сигнала [12], согласно которой мощность сигнала на приемнике P_{rx} , находящемся на расстоянии r от передатчика, определяется следующим образом:

$$P_{rx}(r) = P_{tx} - PL(r) ,$$

где затухание в канале

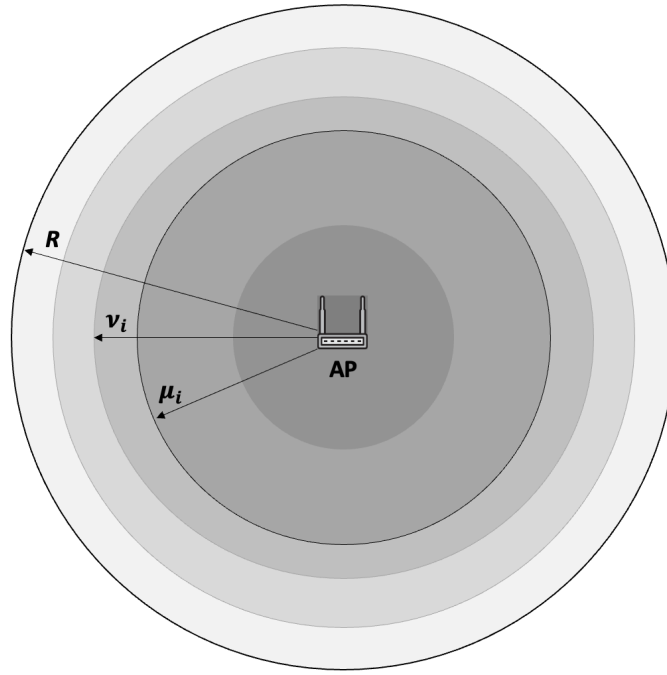


Рис. 4. Схематичное расположение колец, соответствующих различным СКК. ν_i и μ_i — границы кольца, соответствующего СКК $_i$.

$$PL(r) = 40,05 + 20 \lg \left(\frac{f}{2,4} \right) + 20 \lg (\min(r, 5)) + \mathbb{I}(r > 5) \times B \lg \left(\frac{r}{5} \right).$$

Здесь P_{tx} — мощность сигнала при передаче, f — частота сигнала, выраженная в ГГц, $B = 35$, а $\mathbb{I}(x)$ — индикатор.

Для использования UL NOMA требуется, чтобы разница мощности сигнала от Secondary STA на AP и мощности шума была больше либо равна константе γ — минимальному отношению сигнал/шум (англ.: Signal-to-Noise Ratio, SNR), при котором возможен прием на наиболее надежной СКК.

Поэтому справедливо следующее соотношение для радиусов, при котором возможна передача UL NOMA:

$$r_0 \leq r_1 \times 10^{-\frac{\gamma}{B}}. \quad (1)$$

При передаче с помощью EDCA станция выбирает СКК в зависимости от ее расстояния до AP. Поэтому весь круг радиуса R можно разделить на кольца, в каждом из которых Primary STA может передавать на скорости, соответствующей заданной сигнально-кодовой конструкции, и не может передавать на более высокой, как показано на рис. 4. Ближней и дальней границей кольца i -й СКК является радиусы μ_i и ν_i , соответственно. Скорость передачи при использовании СКК $_i$ обозначим за ω_i . Тогда вероятность того, что Primary STA передает на скорости ω_i , определяется вероятностью нахождения Primary STA в i -м кольце:

$$\mathbf{P}_{\text{СКК}_i} = \frac{\nu_i^2 - \mu_i^2}{R^2}. \quad (2)$$

Будем обозначать такую станцию Primary STA i .

Все Primary STA передают кадры фиксированного размера $E_{Primary}$ с помощью EDCA. Отметим, что коллизия может возникнуть только в том случае, если больше одной Primary STA передают в один момент времени. В случае успешной передачи с помощью EDCA может произойти передача с помощью UL NOMA согласно механизму, описанному в разделе 2.2.

Целью данной работы является разработка аналитической модели сети Wi-Fi, использующей механизм UL NOMA с RS, которая позволит оценить пропускную способность системы при разном количестве станций в сети.

Таблица 1. Используемые обозначения.

Название	Обозначение
Количество станций в сети	n
Минимальный размер конкурентного окна	CW_{min}
Вероятность того, что станция передает в рассматриваемом слоте	τ
Объем данных, передаваемых Primary STA	$E_{Primary}$
Объем данных, передаваемых Secondary STA при передаче Primary STA i	$E_{Secondary}^i$
Радиус круга	R
Скорость при использовании i -й СКК	ω_i
Количество индексов СКК в системе	$\mathbb{K}$
Расстояние от AP до Secondary STA	r_0
Расстояние от AP до Primary STA	r_1
Дальняя граница кольца СКК $_i$	ν_i
Ближняя граница кольца СКК $_i$	μ_i
Скорость Primary STA при передаче на СКК $_i$	$\omega_{Primary}^i$
Скорость Secondary STA при передаче Primary STA i	$\omega_{Secondary}^i$
Плотность вероятности распределения расстояния от AP до Primary STA	$\rho(r_1)$
Минимальное отношение сигнал/шум	γ
Длительность преамбул физического уровня кадра данных	D_{PHY}

4. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

4.1. Вывод пропускной способности EDCA с RTS/CTS

Для анализа сети будем использовать дискретную целочисленную временную шкалу, моменты времени на которой будут соответствовать началам следующих друг за другом виртуальных слотов. Виртуальный слот — промежуток времени между последовательными изменениями счетчика отсрочки каждой станции, которые происходят синхронно.

Приведем выражения для пропускной способности S сети Wi-Fi, использующей EDCA с механизмом RTS/CTS, согласно работе [13]:

$$S = \frac{\mathbf{P}_s \mathbf{P}_{tr} E_{Primary}}{(1 - \mathbf{P}_{tr})\sigma + \mathbf{P}_{tr} \mathbf{P}_s < T_s > + \mathbf{P}_{tr}(1 - \mathbf{P}_s)T_c},$$

где $E_{Primary}$ — размер передаваемых данных, $\mathbf{P}_s$ — вероятность успешной передачи станции, $\mathbf{P}_{tr}$ — вероятность того, что осуществляется хотя бы одна передача в выбранном виртуальном слоте, $< T_s >$ — средняя длительность успешной передачи, T_c — длительность коллизии кадров RTS, σ — длительность пустого слота.

Вероятность успешной передачи станции в сети из n станций при использовании механизма EDCA выражается следующим образом:

$$\mathbf{P}_s = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{\mathbf{P}_{tr}}. \quad (3)$$

Вероятность того, что осуществляется хотя бы одна передача в выбранном слоте:

$$\mathbf{P}_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n, \quad (4)$$

а τ — вероятность того, что станция передает в рассматриваемом слоте. Она выражается следующим образом:

$$\tau = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(1 + CW_{min}) + pCW_{min}(1 - (2p)^m)}. \quad (5)$$

Вероятность коллизии при передаче:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1}. \quad (6)$$

Таким образом, решая систему уравнений (5) и (6), можно найти значения p и τ .

Пусть *SIFS*, *AIFS*, *EIFS*, *ACK*, *RTS*, *CTS* — длительности межкадровых интервалов EDCA, кадра подтверждения (ACK) и кадров RTS/CTS, соответственно. Длительность успешной передачи Primary STA складывается из длительности передачи кадра с данными, длительности межкадровых интервалов SIFS и AIFS, а также длительности служебных кадров RTS, CTS, ACK. Оценим длительность кадра как сумму длительности преамбулы физического уровня D_{PHY} , и длительности передачи полезных данных $E_{Primary}$ и заголовка канального уровня H_{MAC} . Тогда средняя длительность успешной передачи $\langle T_s \rangle$ определяется следующим образом:

$$\langle T_s \rangle = RTS + CTS + 3 \times SIFS + AIFS + ACK + D_{PHY} + \sum_{i=0}^{\mathbb{K}} \mathbf{P}_{CKK_i} \times \frac{H_{MAC} + E_{Primary}}{\omega_{Primary}^i},$$

где $\omega_{Primary}^i$ — скорость передачи данных Primary STA с помощью СКК_{*i*}, а длительность коллизии равна

$$T_c = RTS + EIFS.$$

4.2. Вывод пропускной способности UL NOMA с RS

Скорость передачи Secondary STA связана с расположением Primary STA. Поэтому необходимо пересчитать границы колец СКК для Secondary STA с учетом передачи Primary STA *i*. Для этого предполагается, что Primary STA *i* находится на таком расстоянии r_1 от AP, что оно разбивает текущее *i*-е кольцо СКК на два подкольца одинаковой площади. Обозначим новые границы колец СКК_{*j*} для Secondary STA как ν_j^i и μ_j^i .

Тогда вероятность того, что некоторая станция является Secondary STA и использует СКК_{*j*} при передаче Primary STA *i*:

$$\mathbf{P}_j^i = \frac{(\nu_j^i)^2 - (\mu_j^i)^2}{R^2}. \quad (7)$$

Заметим, что величина $1 - \frac{(\nu_0^i)^2}{R^2}$ есть вероятность того, что станция не является Secondary STA.

При стратегии MR AP выбирает Secondary STA с наибольшей скоростью передачи, т.е. выбирается ближайшая к AP Secondary STA. Найдем вероятность того, что хотя бы одна

Secondary STA относится к j -ому кольцу и ни одна не расположена в кольцах, меньших чем j -е кольцо:

$$\mathcal{P}_j^i = \frac{1}{\mathbf{P}_{Secondary}^i} \sum_{l=1}^{n-1} \mathbf{P}_{l \text{ Secondary}}^i \left[(\mathcal{D}^i(j))^l - (\mathcal{D}^i(j-1))^l \right], \quad (8)$$

где $\mathcal{D}^i(j)$ — функция распределения скоростей Secondary STA, которая выражается через распределение этих скоростей:

$$\mathcal{D}^i(j) = \sum_{j'=0}^j \mathbf{P}_{j'}^i,$$

а $\mathbf{P}_{Secondary}^i$ — вероятность того, что найдется хотя бы одна Secondary STA при передаче Primary STA i :

$$\mathbf{P}_{Secondary}^i = 1 - \left(1 - \frac{(\nu_0^i)^2}{R^2} \right)^{n-1}.$$

Вероятность того, что есть ровно l Secondary STA при передаче Primary STA i :

$$\mathbf{P}_{l \text{ Secondary}}^i = C_{n-1}^l \left(\frac{(\nu_0^i)^2}{R^2} \right)^l \left(1 - \frac{(\nu_0^i)^2}{R^2} \right)^{n-1-l}. \quad (9)$$

Теперь средняя скорость Secondary STA при передаче Primary STA i выражается как математическое ожидание случайной величины ω_j :

$$\langle \omega_{Secondary}^i \rangle = \sum_{j=0}^{\mathbb{K}} \mathcal{P}_j^i \times \omega_j. \quad (10)$$

Объём переданных данных $E_{Secondary}$ Secondary STA при NOMA-передаче зависит от расположения этой Secondary STA r_0 и, как следствие, от расположения Primary STA r_1 . Оценка объема данных $E_{Secondary}^i$, передаваемых Secondary STA при передаче Primary STA i выражается следующей формулой:

$$\begin{aligned} E_{Secondary}^i &= \langle \omega_{Secondary}^i \rangle \times (T_{payload}^i - D_{PHY}) - H_{MAC} = \\ &= \frac{\langle \omega_{Secondary}^i \rangle}{\omega_{Primary}^i} [H_{MAC} + E_{Primary}] - H_{MAC}. \end{aligned} \quad (11)$$

Значит, среднее значение переданных данных от Secondary STA при условии наличия передачи UL NOMA есть:

$$\langle E_{Secondary} \rangle = \sum_{i=0}^{\mathbb{K}} \mathbf{P}_{CKK_i} \times E_{Secondary}^i.$$

Абсолютная вероятность того, что найдется хотя бы одна Secondary STA, выражается следующим образом:

$$\mathbf{P}_{Secondary} = \int_0^R \rho(r_1) \left[1 - \left(1 - \frac{r_0^2(r_1)}{R^2} \right)^{n-1} \right] dr_1 = 1 - \sum_{l=0}^{n-1} \frac{(-1)^l}{l+1} C_{n-1}^l \times 10^{-\frac{2\gamma}{B}},$$

где $\rho(r_1) = \frac{2r_1}{R^2}$ — плотность вероятности распределения расстояния от АР до Primary STA, $r_0(r_1) = r_1 \times 10^{-\frac{\gamma}{B}}$ — максимальное расстояние от АР до Secondary STA. Это и есть вероятность передачи UL NOMA.

Итак, общий вид суммарной пропускной способности канала для сети при использовании UL NOMA с RS при стратегии выбора MR на точке доступа есть:

$$S = \frac{\mathbf{P}_s \mathbf{P}_{tr}(E_{Primary} + \mathbf{P}_{Secondary} < E_{Secondary} >)}{(1 - \mathbf{P}_{tr})\sigma + \mathbf{P}_{tr} \mathbf{P}_s < T_s > + \mathbf{P}_{tr}(1 - \mathbf{P}_s)T_c}. \quad (12)$$

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Таблица 2. Сигнально-кодовые конструкции, используемые в работе.

Индекс СКК	Скорость ω_i (в Мбит/с)	SNR (в дБ)	μ_i (в м)	ν_i (в м)
0	8,6	3,98	133,9	163,0
1	17,2	6,99	110,7	133,9
2	25,8	9,88	87,1	110,7
3	34,4	13,53	71,0	87,1
4	51,6	16,63	57,9	71,0
5	68,8	21,38	47,8	57,9
6	77,4	22,64	44,2	47,8
7	86,0	23,81	32,5	44,2
8	103,2	28,51	30,0	32,5
9	114,7	29,72	23,2	30,0
10	129,0	33,62	21,1	23,2
11	143,4	35,06	0,0	21,1

Таблица 3. Используемые значения.

Название переменной	Обозначение	Величина
Радиус круга системы	R	82 м
Мощность сигнала при передаче	P_{tx}	21 дБм
Частота сигнала	f	2,4 ГГц
Ширина канала	ΔF	20 МГц
Размер данных Primary STA	$E_{Primary}$	8 Кбайт
Заголовок канального уровня	H_{MAC}	400 бит
Длительность преамбулы кадра данных	D_{PHY}	40 мкс
Длительность пустого слота	σ	9 мкс
SIFS	$SIFS$	16 мкс
AIFS	$AIFS$	34 мкс
EIFS	$EIFS$	94 мкс
ACK	ACK	44 мкс
RTS	RTS	40 мкс
CTS	CTS	36 мкс
Мин. размер конкурентного окна	W	16
Макс. размер конкурентного окна	W_{max}	1024

Рассмотрим сеть Wi-Fi, состоящую из одной точки доступа и n станций, равномерно распределенных внутри круга радиуса R и передающих в насыщении. Схема сети проиллюстрирована на рис. 3. У всех Primary STA фиксированная длина кадра данных $E_{Primary}$. Точка доступа располагается в центре круга. По умолчанию все станции передают основные кадры, используя EDCA вместе с механизмом RTS/CTS. Параметры имитационной модели приведены в таблицах 2 и 3.

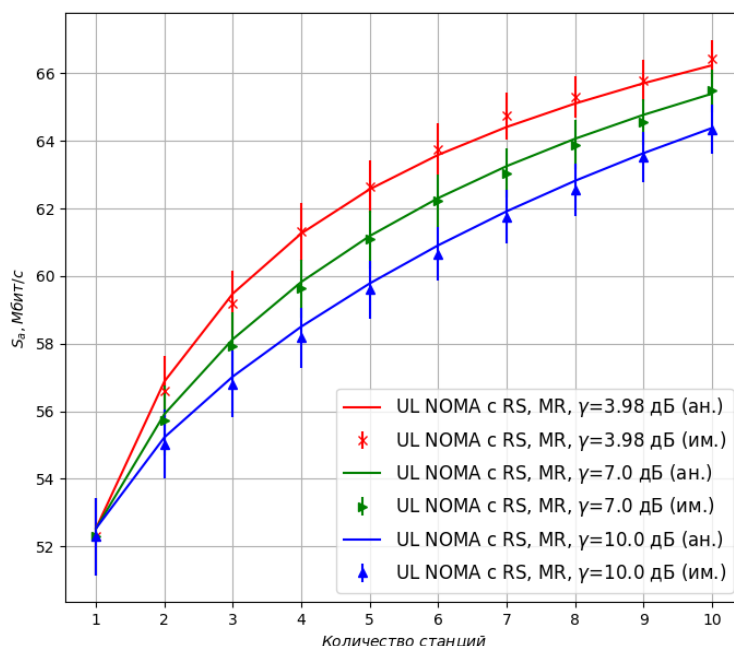


Рис. 5. Суммарная пропускная способность сети при использовании UL NOMA с RS MR при различных значениях параметра γ .

Вначале выберем радиус системы R таким образом, чтобы каждая станция могла стабильно принимать данные на СКК₀ от всех станций в круге. На рис. 5 представлено сравнение результатов, полученных с помощью аналитической и имитационной моделей при различных значениях порога γ . Результаты демонстрируют, что при увеличении порога γ уменьшается пропускная способность. Это связано с тем, что меньшее количество Secondary STA может участвовать в передаче UL NOMA. Как следствие, большее количество станций вообще не передает с использованием UL NOMA. Наименьшее значение $\gamma = 3,98$ дБ, которое соответствует минимальной разнице мощностей на точке доступа для приема сигнала на минимальной скорости ω_0 , дает максимальное значение суммарной пропускной способности.

Рис. 6 отражает, как суммарная пропускная способность зависит от числа станций. Помимо рассматриваемого метода доступа, на графике изображены метод доступа из работы [9], использующий UL NOMA без RS, и EDCA. Из представленных графиков следует, что использование UL NOMA с RS дает прирост суммарной пропускной способности до 30% по сравнению с использованием метода доступа EDCA.

Относительная погрешность аналитической модели не превышает 5%. Расхождения могут быть связаны с методом подсчета новых границ подколец в выражении (7).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена аналитическая модель для оценки пропускной способности сети Wi-Fi, в которой применяется неортогональный множественный доступ в восходящем канале с использованием резервирующих сигналов и механизма RTS/CTS. Каждая станция, претендующая на NOMA-передачу, передает резервирующий сигнал на точку доступа при обнаружении успешного RTS-кадра. Для однозначного выбора станции для NOMA-передачи

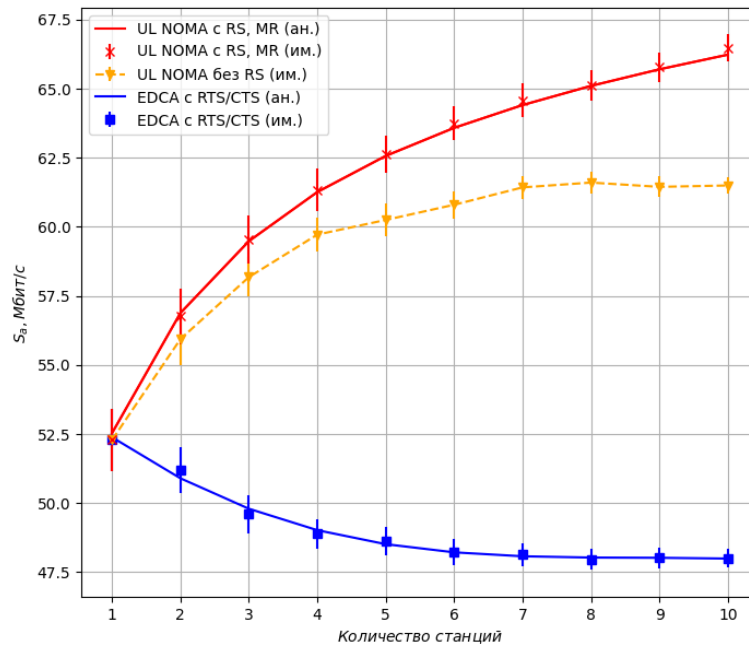


Рис. 6. Зависимость суммарной пропускной способности сети от количества станций.

применяется стратегия, направленная на максимизацию суммарной пропускной способности сети. Точка доступа вместе с кадром CTS передает выбранный резервирующий сигнал, предназначенный только для определенной станции.

Используя предложенную модель, проведена оценка пропускной способности сети Wi-Fi для различного количества станций и пороговых значений отношения сигнал/шум, определяющих возможность передачи с помощью UL NOMA. Сравнение с результатами имитационного моделирования показывает, что представленная модель обладает хорошей точностью.

Результаты данной работы позволяют заключить, что использование неортогонального множественного доступа в восходящем канале является перспективным для будущих стандартов Wi-Fi.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CISCO (2020). Cisco Annual Internet Report (2018-2023) White Paper.
2. Khorov, Evgeny and Kureev, Aleksey and Levitsky, Ilya and Akyildiz, Ian F (2020). Prototyping and experimental study of non-orthogonal multiple access in Wi-Fi networks. IEEE Network, 34(4), 210-217
3. Khorov, Evgeny and Kureev, Aleksey and Levitsky, Ilya and Akyildiz, Ian F (2022). A Phase Noise Resistant Constellation Rotation Method and Its Experimental Validation for NOMA Wi-Fi. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 40(4), 1346-1354
4. Endovitskiy, Egor and Kureev, Aleksey and Levitsky, Ilya and Tutelian, Sergey and Khorov, Evgeny (2021). Performance Evaluation of Downlink Non-Orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks. Journal of Communications Technology and Electronics, 66(12), 1485-1490
5. R. Zlobin, A. Kureev and E. Khorov (2022). Receiver Design and Frame Format for Uplink NOMA in Wi-Fi. IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS).

6. Ghazi, H. S., Wesolowski, K. (2018). Uplink NOMA scheme for Wi-Fi applications. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 64(4), 481-485.
7. Zhang, H. , Zhang, D. , Meng, W. , Li, C. (2016) User pairing algorithm with SIC in non-orthogonal multiple access system. 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC),1-6.
8. Pavan, B. S., Harigovindan, V. P. (2021). A novel channel access scheme for NOMA based IEEE 802.11 WLAN.
9. Korolev, G., Kureev, A., Khorov, E., Shmelkin, D. (2020, November). Performance evaluation of Uplink NOMA in Wi-Fi networks. In 2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T) (pp. 1-5). IEEE.
10. Korolev, G., Kureev, A., Khorov, E., Lyakhov, A. (2021, November). Enabling Synchronous Uplink NOMA in Wi-Fi Networks. In 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T) (pp. 1-5). IEEE.
11. Khorov, E., Kiryanov, A., Lyakhov, A., Bianchi, G. (2018). A tutorial on IEEE 802.11 ax high efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(1), 197-216.
12. Merlin, Simone and Barriac, G. and Sampath, H. and Cariou, L. and Derham, T. TGax simulation scenarios. *IEEE802*, 2015.
13. Bianchi, G. (2000). Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 18(3), 535-547.

Performance evaluation of Uplink Non-Orthogonal Multiple Access with Reservation Signals in Wi-Fi networks

Korolev G.S., Kureev A.A., Lyakhov A.I., Khorov E.M.

Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) is a promising technology, which can improve the spectral efficiency and throughput of Wi-Fi networks. Uplink NOMA (UL NOMA) allows multiple stations to transmit data to an access point in the same frequency-time resource. Reservation signals are used to organize an UL NOMA data transmission. This paper presents an analytical model, that aims to evaluate the performance of the UL NOMA mechanism with different Wi-Fi network parameters.

KEYWORDS: Wi-Fi, non-orthogonal multiple access, NOMA, uplink.