

Оценка производительности сети Wi-Fi с использованием Uplink NOMA и резервирующих сигналов ^{*}

Королев Г.С., Куреев А.А.

ИППИ РАН
{korolev, kureev}@wireless.iitp.ru

Аннотация Неортогональный множественный доступ (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) является одной из самых перспективных технологий передачи данных в гетерогенных сетях. Она позволяет пользователям с различными канальными условиями осуществлять одновременную передачу на одной частоте за счёт разделения сигнала по уровню мощности. NOMA рассматривается комитетом IEEE (англ.: Institute of Electrical and Electronics Engineers) как технология для имплементации в будущих стандартах Wi-Fi. В текущей работе представлен механизм передачи данных в сетях Wi-Fi, работающий с NOMA в восходящем канале (англ.: Uplink, UL), а также использующий механизм RTS/CTS (англ.: Request-to-Send/Clear-to-Send) совместно с резервирующими сигналами. Также представлена оценка его производительности. Полученные результаты показывают прирост суммарной пропускной способности и геометрического среднего пропускных способностей устройств в сети с NOMA до 100% по сравнению с использующимся механизмом EDCA (англ.: Enhanced Distributed Coordination Access) в Wi-Fi.

1 Введение

Wi-Fi — самая популярная, относительно дешевая и легко развертываемая беспроводная технология передачи данных [1]. Wi-Fi используется в различных сценариях со многими пользовательскими устройствами: аэропортами, университетами, торговыми центрами, стадионами и т. д. В связи с этим проблема увеличения пропускной способности становится особенно острой.

Неортогональный множественный доступ (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) — это новый подход к увеличению пропускной способности в сетях Wi-Fi. NOMA позволяет устройствам передавать несколько потоков данных одновременно на одной и той же частоте. В нисходящем канале NOMA (англ.: Downlink NOMA, DL-NOMA) точка доступа (англ.: Access Point, AP) передает данные для нескольких станций (англ.: Station, STA), в

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

то время как в восходящем канале NOMA (англ.: Uplink NOMA, UL-NOMA) несколько станций передают кадры одной AP.

Хотя DL-NOMA демонстрирует свою эффективность в Wi-Fi [2], полезность UL-NOMA в Wi-Fi остается открытым вопросом. Чтобы объяснить причину этого, приведём описание того, как работает UL-NOMA.

Рассмотрим сеть Wi-Fi с двумя STAs и одной AP. STAs расположены на разном расстоянии от точки доступа и имеют разные канальные условия. Обе STAs передают кадры AP. В UL-NOMA AP принимает суперпозицию сигналов (кадр NOMA) от обеих STAs. Мы изучаем синхронный UL-NOMA, который предполагает, что STA начинают передачу данных одновременно. Успешный прием обоих кадров возможен, если мощности принимаемых сигналов от STA различны: мощность от удаленной STA ниже, чем мощность STA, расположенной ближе к AP. Для декодирования такого сигнала точка доступа использует метод последовательного подавления помех (англ.: Successive Interference Cancellation, SIC). SIC позволяет AP декодировать сигналы последовательно. Сначала точка доступа декодирует более сильный сигнал, считая другой шумом. После этого AP вычитает декодированный сигнал из исходного и декодирует остальную часть сигнала.

Хотя идея UL-NOMA довольно проста, но на практике есть ряд проблем в реализации этого метода.

Основная из них связана с организацией передачи UL-NOMA в Wi-Fi. Самый простой способ — это расписание передач STA. Однако расписание передач нарушает обратную совместимость и делает UL-NOMA несовместимым с EDCA, который изначально используется в Wi-Fi для случайного доступа к каналу.

В данной работе используется синхронный метод передачи данных в восходящем канале с помощью NOMA в сетях Wi-Fi вместе с механизмом RTS/CTS (англ.: Request-to-Send/Clear-to-Send) и резервирующих сигналов (англ.: Reservation Signal, RS). Так, RTS/CTS позволяет осуществлять синхронную передачу, а резервирующие сигналы — координацию передач. Производительность разработанного механизма оценивается с помощью имитационного моделирования. Полученные результаты показывают, что использование NOMA в восходящем канале в Wi-Fi даёт выигрыш до 100% по сравнению с базовым подходом.

Оставшаяся часть работы устроена следующим образом. Раздел 2 представляет обзор статей, исследующих NOMA. Раздел 3 детально описывает механизм передачи данных и формулировку проблемы, а 4 объясняет сценарий эксперимента. Полученные результаты обсуждаются в разделе 5. Раздел 6 завершает работу.

2 Обзор литературы

UL-NOMA широко используется в сотовых сетях пятого поколения [3]. Поскольку они в основном используют доступ к каналу по расписанию, синхронный UL-NOMA идеально подходит для архитектуры сотовой сети [4].

Таким образом, базовая станция знает о состоянии канала всех пользователей и может организовать передачу UL-NOMA [5]. Однако в Wi-Fi нет возможности сделать то же самое, если STA используют метод случайного доступа к каналу.

В нашей предыдущей статье [6] мы рассматривали механизм асинхронной передачи NOMA в Wi-Fi, который можно использовать с EDCA. В предлагаемой схеме основной кадр разделен на слоты. STA начинает передачу в NOMA с успешного слота в пределах одного основного кадра. Однако у этого механизма есть проблемы с реализацией, связанные с независимой оценкой канала для всех кадров в пределах одного кадре NOMA.

В нескольких работах рассматривается синхронная передача NOMA в Wi-Fi. В статье [7] рассматривается механизм передачи, основанный на алгоритме кластеризации пользователей (англ.: Channel State Sorting-Pairing Algorithm, CSS-PA). AP выбирает две STA на основе состояния их канала и планирует передачу UL-NOMA для этой пары. В статье [8] представлен механизм передачи UL-NOMA, который работает с EDCA. AP группирует STA для передачи UL-NOMA в зависимости от их схем модуляции и кодирования (MCS). У каждой группы есть главная STA, которая находится ближе к AP, чем другие. В предложенной схеме только главные STA конкурируют за канал, а остальные STA передают данные только в UL-NOMA. Такой способ ограничивает передачу остальных STA, что приводит к несправедливому потреблению ресурсов канала.

В этой статье мы разрабатываем синхронный механизм передачи UL-NOMA, который работает с EDCA и позволяет всем STAs передавать в EDCA с UL-NOMA.

В следующей главе подробно объясняется работа разработанного механизма, формулируется постановка задачи исследования.

3 Описание разработанного механизма

3.1 Механизм EDCA с RTS/CTS

Поскольку разработанный механизм основан на EDCA, стоит кратко описать его работу. При использовании EDCA все станции устанавливают счётчик отсрочки до передачи. Его значение является случайной величиной из диапазона $[0, CW_r - 1]$, где CW_r зависит от числа попыток r передачи текущего кадра. 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 эфиру, записано и в RTS-кадре, и в CTS-кадре. Когда канал свободен, каждая станция уменьшает счётчик отсрочки на единицу по истечении времени пустого слота (σ). Когда канал занят в случае успешной или неуспешной передачи, станции замораживают счётчик. Если несколько STA начинают передачу одновременно, возникает коллизия и кадры искажаются.

3.2 Механизм NOMA RS

Цель исследования состоит в разработке механизма доступа к каналу и оценке его производительности в терминах суммарной пропускной способности и среднего геометрического пропускных способностей.

Будем называть разработанный механизм NOMA RS, который работает при успешной передаче в EDCA совместно с RTS/CTS. Используемый механизм обладает следующими характеристиками:

- Использует RTS/CTS и RS вместе с EDCA.
- Работает совместно с EDCA без нарушения метода случайного доступа.
- Уменьшает число коллизий кадров от станций, передающих в NOMA.

Назовём STA, которая осуществляет успешную передачу с EDCA, основной станцией, а STA, которая передает с UL-NOMA поверх основного кадра, — NOMA-станцией.

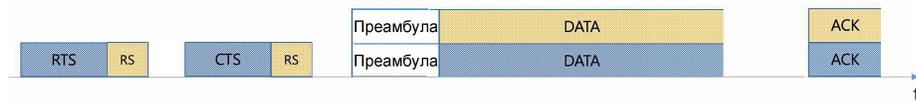


Рис. 1: Схема передаваемых кадров.

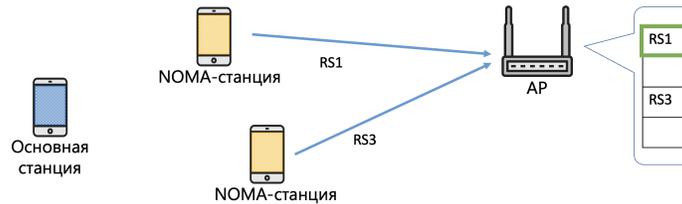


Рис. 2: Схематичное представление исследуемой системы.

В дополнение к информации о продолжительности кадра преамбула кадра основной станции содержит информацию об используемом MCS, который выбирается динамически, основываясь на SNR. Следовательно, с помощью MCS можно оценить, на каком расстоянии от точки доступа расположена передающая станция.

Мы будем предполагать идеальное знание о мощности кадра на принимающем устройстве от основной станции. Если принимаемая мощность кадра P_{RX}^i и мощность шума P_n , то

$$SNR_i = \frac{P_{RX}^i}{P_n} \quad (1)$$

Эта информация оценивается в течение предыдущей передачи данных между STA_i и AP. После прочтения поля LTF, в котором содержится информация о SNR_i , STA_j оценивает свой собственный SNR_j^{NOMA} , учитывая, что будет передача с NOMA:

$$SNR_j^{NOMA} = \frac{P_{RX}^j}{P_n + P_{RX}^i}. \quad (2)$$

STA_j принимает решение использовать NOMA, если

1. STA_j находится в зоне радиовидимости STA_i (успешно передающая станция);
2. $SNR_j^{NOMA} \geq \gamma_{min}$,

где γ_{min} — минимальный порог SNR, который позволяет передавать на наиболее надёжном индексе MCS0.

Напомним, что все основные станции используют механизм RTS/CTS. Таким образом, при передаче кадра RTS от основной станции на точку доступа STA_j понимает, что она является NOMA-станцией и посылает свой уникальный ортогональный резервирующий сигнал RS_j на AP. Это возможно сделать потому, что при увеличении ширины канала по частоте увеличивается и количество ресурсных блоков (англ.: Resource Unit), которые позволяют составить резервирующий сигнал. В данной работе будем считать, что частотная полоса, занимаемая резервирующим сигналом, равна ширине полосы минимального ресурсного блока в сетях IEEE 802.11ax. Если число резервирующих сигналов больше числа станций сети, то RS считается уникальным для каждой STA в сети.

Точка доступа знает, какой RS использует какая станция, тем самым имея возможность выбора NOMA-станции. Вместе с ответным кадром CTS для дальней станции точка доступа также посылает выбранный RS, который обрабатывается только определённой ближней станцией. Следовательно, инициируется NOMA-передача. Общая схема кадров показана на рис. 1 и рис. 2 даёт общий вид системы.

Так как точке доступа приходится выбирать определённый резервирующий сигнал, то предлагается рассмотреть несколько стратегий выбора передающей NOMA-станции. Пусть r_i — скорость передачи данных, определяемая текущей MCS, R_i — число переданных бит полезной информации за период времени до текущей передачи, отнесённое к его длительности. Тогда используемые стратегии выбора станций:

- Max Rate — максимизация пропускной способности, использует метрику r_i ;
- Proportional Fair — пропорционально честное распределение ресурсов, использует метрику $\frac{r_i}{R_i}$.

В случае успешной NOMA-передачи точка доступа декодирует оба сигнала (от основной и от NOMA-станции) и отправляет кадр подтверждения, используя DL-NOMA. Так как дальняя станция, которая передаёт кадр, имеет наихудшие каналные условия, то кадр NOMA-ACK в нисходящем трафике состоит из ACK меньшей мощности, предназначенный для NOMA-станции, и большей мощности для основной.

4 Описание сценария, рассматриваемого в эксперименте

Таблица 1: Сигнально-кодовые конструкции

MCS индекс	Скорости передачи (в Мбит/с)	SNR (в дБ)
0	8.6	3.98
1	17.2	6.99
2	25.8	9.88
3	34.4	13.53
4	51.6	16.63
5	68.8	21.38
6	77.4	22.64
7	86.0	23.81
8	103.2	28.51
9	114.7	29.72
10	129.0	33.62
11	143.4	35.06

Рассмотрим сеть Wi-Fi, состоящую из N станций, равномерно распределённых внутри круга радиуса R и передающих в насыщении. Радиус выбирается таким образом, чтобы каждая станция могла стабильно принимать данные с MCS0 от всех станций в круге. У всех основных станций фиксированная длина кадра данных $l = 8$ Кбайт. Точка доступа располагается в центре окружности. По умолчанию все станции передают обычные кадры, используя EDCA. Отметим, что коллизия может возникнуть, если больше одной основной станции передают в один момент времени. В данной работе используется логарифмическая модель затухания сигнала (англ.: Log-distance radio propagation model) [9], которая определяет потери PL следующим образом:

$$PL = P_{TX} - P_{RX} = PL_0 + 10\beta \log_{10} \frac{d}{d_0}, \quad (3)$$

где PL_0 — потери на расстоянии d_0 , β — показатель потерь, P_{TX} — мощность передачи каждой станции вместе с усилением антенны. Будем считать, что мощности передачи всех станций одинаковы. Основные станции измеряют

SNR, используя выражение (1), NOMA-станции используют уравнение (2) из раздела 3 для измерения SNR и определения, возможна ли передача с помощью NOMA. Перед передачей каждая станция выбирает MCS, опираясь на измеренный SNR. Сигнально-кодовая конструкция выбирается из таблицы 1, которая содержит эталонные пороги для стандарта IEEE 802.11ax [10].

Таблица 2: Таблица переменных и обозначений

Название переменной	Переменная	Значение
Радиус системы	R_1	47.55 м
Радиус системы	R_2	95.11 м
Мощность сигнала при передаче	P_{TX}	16 дБм
Мощность шума	P_n	-90 дБм
Минимальное значение SNR	γ_{min}	3.98 дБ
Ширина канала	ΔF	20 МГц
Передаваемые данные	l	8 Кбайт
Параметр затухания мощности	β	2.6
Заголовок кадра	H	400 бит
SIFS	$SIFS$	16 мкс
DIFS	$DIFS$	34 мкс
ACK	T_{ACK}	44 мкс
RTS	RTS	160 бит
CTS	CTS	112 бит
Время пустого слота	σ	9 мкс
Мин. размер окна отсрочки	CW_{min}	16
Макс. размер окна отсрочки	CW_{max}	1024
Количество запусков эксперимента	n_s	100

5 Результаты

Параметры имитации приведены в Таблице 2. Для каждого количества станций N было проведено n_s экспериментов с различными начальными значениями позиций для усреднения результатов.

Рис. 3а и 4а отражают, как суммарная пропускная способность зависит от числа станций и различных планировщиков ресурсов. Так, при использовании MaxRate достигается наибольшая суммарная пропускная способность системы. Из представленных графиков следует, что использование NOMA в UL даёт прирост суммарной пропускной способности и среднего геометрического пропускных способностей до 100%.

Очевидно, что с увеличением числа станций в системе возрастает и количество станций, претендующих на участие в NOMA-передаче. Из представленных рис. 3а и 4а следует, что использование алгоритма MaxRate выбора

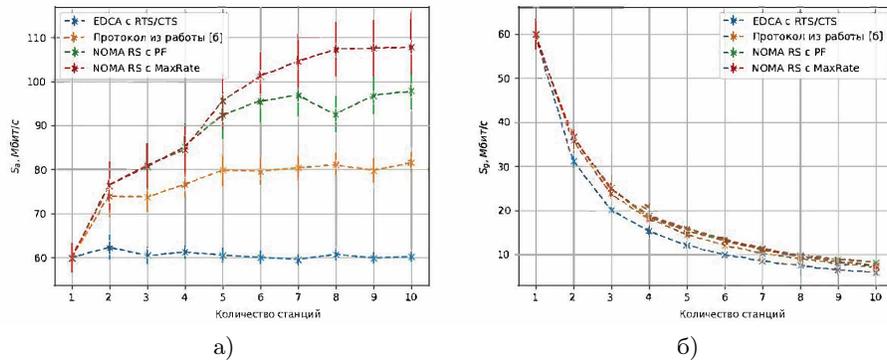


Рис. 3: Результаты суммарной пропускной способности (а) и геометрической средней пропускных способностей (б) системы при радиусе R_1 .

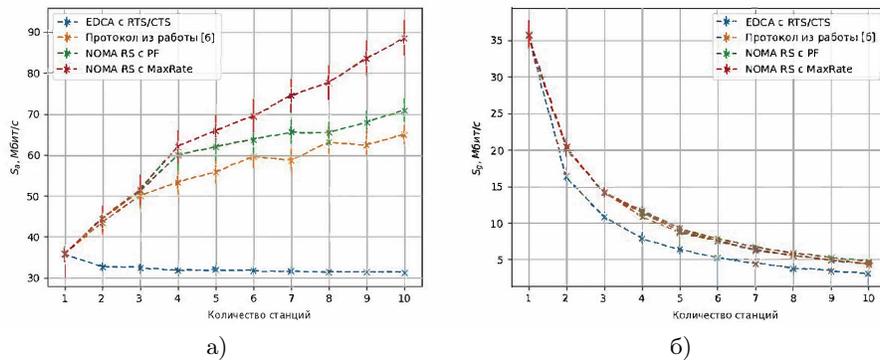


Рис. 4: Результаты суммарной пропускной способности (а) и геометрической средней пропускных способностей (б) системы при радиусе R_2 .

NOMA-станции на точке доступа увеличивает суммарную пропускную способность системы.

Рис. 3б и 4б показывают, что среднее геометрическое пропускных способностей станций при использовании обычного метода доступа стремится к нулю быстрее по сравнению с предложенным подходом в работе [6] и описанным в данной работе. Малое геометрическое среднее пропускных способностей означает неравномерное распределение ресурсов внутри сети. Использование разработанного механизма NOMA RS с PF обеспечивает выигрыш до 100% в геометрическом среднее пропускных способностей. Данный прирост обусловлен тем, что стратегия выбора PF направлена на обеспечение пропорционально честного распределения ресурсов сети среди NOMA-станций.

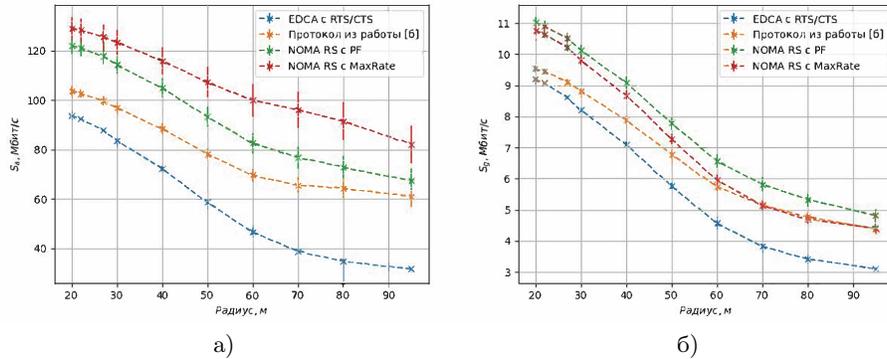


Рис. 5: Результаты суммарной пропускной способности (а) и геометрического среднего пропускных способностей (б) системы для 10 станций при различных радиусах.

Также в ходе исследования была получена зависимость суммарной пропускной способности и геометрического среднего от радиуса системы (рис. 5а и 5б). Видно, что с увеличением максимального расстояния от крайней станции до точки доступа производительность системы снижается из-за появления станций с MCS низких порядков.

6 Заключение

В данной работе оценивается производительность UL-NOMA для сетей Wi-Fi. Основная идея заключается в совмещении классического механизма Wi-Fi EDCA с RTS/CTS и нового метода резервирующих сигналов. Так, каждая станция, претендующая на NOMA-передачу, передаёт уникальный RS на точку доступа при обнаружении успешного RTS-кадра. На AP в свою очередь работает планировщик ресурсов (Max Rate или Proportional Fair), который позволяет максимизировать либо пропускную способность системы, либо её геометрическое среднее. Выбрав NOMA-станцию, точка доступа вместе с кадром CTS для основной станции передаёт и выбранный резервирующий сигнал, предназначенный только для определённой станции. Таким образом, коллизии на уровне NOMA-передач полностью исключаются.

Полученные результаты показывают, что использование NOMA совместно со стандартным механизмом EDCA даёт увеличение суммарной пропускной способности и геометрического среднего пропускных способностей приблизительно до 100%. Данная работа показывает, что использование технологии неортогонального множественного доступа в восходящем трафике является перспективной для будущего применения в стандартах Wi-Fi.

Список литературы

1. CISCO. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. — 2020.
2. 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.
3. Uplink non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks / Mohammed Al-Imari, Pei Xiao, Muhammad Ali Imran, Rahim Tafazolli // 2014 11th international symposium on wireless communications systems (ISWCS) / IEEE. — 2014. — P. 781–785.
4. Gerasin IS, Krasilov AN, Khorov EM. Dynamic Multiplexing of URLLC Traffic and eMBB Traffic in an Uplink Using Nonorthogonal Multiple Access // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2020. — Vol. 65, no. 6. — P. 750–755.
5. A survey of non-orthogonal multiple access for 5G / Linglong Dai, Bichai Wang, Zhiguo Ding et al. // IEEE communications surveys & tutorials. — 2018. — Vol. 20, no. 3. — P. 2294–2323.
6. Performance Evaluation of Uplink NOMA in Wi-Fi Networks / Grigory Korolev, Aleksey Kureev, Evgeny Khorov, Dmitry Shmelkin // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T) / IEEE. — 2020. — P. 1–5.
7. Ghazi Hind Salim, Wesolowski Krzysztof. Uplink NOMA scheme for Wi-Fi applications // International Journal of Electronics and Telecommunications. — 2018. — Vol. 64, no. 4. — P. 481–485.
8. Pavan Badarla Sri, Harigovindan VP. A novel channel access scheme for NOMA based IEEE 802.11 WLAN // Sādhanā. — 2021. — Vol. 46, no. 3. — P. 1–6.
9. Srinivasa Sunil, Haenggi Martin. Path loss exponent estimation in large wireless networks // 2009 Information Theory and Applications Workshop / IEEE. — 2009. — P. 124–129.
10. A tutorial on IEEE 802.11 ax high efficiency WLANs / Evgeny Khorov, Anton Kiryanov, Andrey Lyakhov, Giuseppe Bianchi // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2018. — Vol. 21, no. 1. — P. 197–216.