

## Основанная на экспериментальных данных модель приема NOMA-кадров от точки доступа Wi-Fi<sup>1</sup>

Е.О. Ендовицкий, А.А. Куреев, Е.М. Хоров

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва*  
Поступила в редколлегию 15.09.2023 г., Принята 24.10.2023 г.

**Аннотация**—Как показывают множественные исследования, беспроводные сети, включая Wi-Fi, выигрывают от внедрения неортогонального множественного доступа (NOMA). Всесторонняя оценка этого выигрыша требует моделирования на системном уровне, которое, в свою очередь, нуждается в точной оценки вероятности приема NOMA-кадров. Существующие модели приема NOMA-сигнала либо не учитывают структуру передачи NOMA, либо рассчитывают вероятность приема битов, а не кадров, из-за чего их нельзя напрямую использовать на системном уровне, поскольку для используемых в Wi-Fi кодов связь между этими вероятностями неясна. В данной статье предлагается модель ошибки приема NOMA-кадров, основанная на эмпирических данных, полученных с помощью прототипа приемопередатчика NOMA Wi-Fi. Модель позволяет рассчитать вероятность успешного приема NOMA-кадров в зависимости от используемых сигнально-кодовых конструкций, распределения мощности внутри NOMA-кадра и общего отношения мощности сигнала к шуму. В статье разработанная модель сравнивается с существующим подходом, который приравнивает помехи от передачи NOMA к аддитивному белому гауссовскому шуму и использует распространенные модели приема обычных кадров Wi-Fi. Результаты показывают, что модель позволяет существенно повысить точность оценки производительности сетей NOMA Wi-Fi, а существующий упрощенный подход недооценивает выигрыш, который дает NOMA.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Wi-Fi, модель ошибок, NOMA

**DOI:** 10.53921/18195822\_2023\_23\_4\_579

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Технология Wi-Fi играет значительную роль в передаче данных пользовательского трафика [1] и ожидается, что ее развитие будет продолжаться, отвечая возросшему спросу на высокую скорость и низкую задержку передачи данных. Одним из способов обеспечить высокую скорость доставки данных для большого числа пользователей является использование в Wi-Fi неортогонального множественного доступа (англ.: non-orthogonal multiple access, NOMA) [2]. В отличие от ортогонального множественного доступа, например, с частотным (англ.: frequency division multiple access, FDMA) или временным (англ.: time division multiple access, TDMA) разделением, NOMA позволяет устройствам передавать данные нескольким пользователям одновременно в одном и том же частотном диапазоне. Исследования показывают, что использование NOMA может значительно улучшить производительность сетей Wi-Fi [3–5].

В данной статье рассматривается работа NOMA в сети Wi-Fi, состоящей из одной точки доступа и двух станций (англ.: station, STA), STA1 и STA2. Передача данных в такой сети

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

осуществляется через суперпозиционное кодирование (англ.: superpositional coding, SC) и декодирование на станциях. Общий сигнал формируется как взвешенная сумма двух сигналов, предназначенных для STA1 и STA2. Сигналы соответствуют кадрам данных, передаваемым с помощью различных сигнально-кодовых конструкций (СКК). Эти кадры называются *основным* и *вложенным* кадрами, а их комбинация — NОМА-кадром. Вложенный кадр предназначен STA2, а основной STA1. STA1 декодирует NОМА-кадр стандартным способом, рассматривая вложенный кадр как помеху. STA2, напротив, декодирует как основной, так и вложенный кадры. При этом, STA2 декодирует основной кадр так же, как STA1. Вложенный же кадр декодируется из результата вычитания восстановленного основного кадра из полученного сигнала. Варианты вычитания и декодирования, выполняемые параллельно или последовательно, называются параллельным (англ.: parallel interference cancellation, PIC) и последовательным (англ.: successive interference cancellation, SIC) подавлением помех [6]. Описанная выше схема является сценарием использования NОМА в нисходящем канале, однако, в литературе также исследуется NОМА в восходящем канале [7, 8].

Несмотря на то, что NОМА в Wi-Fi показывает потенциал для улучшения производительности, исследования в NОМА в Wi-Fi зачастую ограничены оценками пропускной способности в статических сценариях. В таких сценариях без рассмотрения оставлено использование NОМА в условиях передачи трафика сложной временной структуры и работы алгоритмов распределения радиоресурсов, поскольку в литературе отсутствуют модели NОМА на системном уровне в Wi-Fi, что ограничивает возможность имитационного моделирования передачи трафика сложной структуры и работы алгоритмов распределения радиоресурсов. Более того, с распространением приложений реального времени [1], таких как, дополненная и виртуальная реальность, становится все более актуальным всестороннее исследование применения NОМА в будущих Wi-Fi сетях за счет снижения задержки в обслуживании [9].

В данной статье предлагается эмпирическая модель приема NОМА-кадров в Wi-Fi. Такая модель на основе экспериментальных измерений имеет то преимущество перед моделями, использующими Matlab WLAN Toolbox [13], что последние не учитывают аппаратные неидеальности, присущие устройствам Wi-Fi. Важность учета этих аппаратных неидеальностей обсуждается в разделе 2. В данной работе предполагается алгоритм приема NОМА-кадра, при котором станция отбрасывает вложенный кадр при некорректном декодировании основного кадра. Таким образом, после выполнения процедуры вычитания сигнала основного кадра из общего сигнала NОМА-кадра помехой приему вложенного кадра является только аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ). По этой причине в работе отдано предпочтение моделированию ошибки приема основного кадра, принимаемого обеими станциями, поскольку по вышеописанной причине для моделирования приема вложенного кадра пригодны существующие модели.

Основным результатом данной работы является вероятностная модель приема основного кадра в NОМА, которая учитывает мощности приема кадров, СКК и мощность шума. Модель основана на эмпирических данных, полученных с помощью прототипа NОМА Wi-Fi [3].

Остальная часть статьи организована следующим образом. Раздел 2 содержит обзор исследований по моделированию NОМА в сетях Wi-Fi. Раздел 3 описывает разработанную модель ошибок. В разделе 4 представлено сравнение разработанной модели с существующими подходами к моделированию NОМА в Wi-Fi. Раздел 5 завершает статью.

## 2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Многочисленные исследования показывают, что NОМА повышает производительность сетей Wi-Fi. В частности, в работе [3] с помощью прототипа приемопередатчика NОМА продемонстрировано увеличение средней геометрической скоростей передачи данных пользователям

на 37% по сравнению с использованием метода множественного доступа с разделением по времени. Имитационное моделирование на системном уровне, проведенное в статьях [4, 11, 12], также подтверждает преимущества использования NOMA в Wi-Fi. Однако в этих работах предполагается, что вложенный кадр является дополнительным источником АБГШ для основного кадра.

Некоторые работы [14–17], наоборот, не делают такого предположения и исследуют прием сигнала NOMA аналитическими методами, используя другие допущения. В частности, авторы этих работ предполагают использование жесткого декодирования, в то время как на практике применяется мягкое декодирование, которое позволяет повысить помехоустойчивость передаваемого сигнала [18]. Поэтому использование вышеупомянутых моделей для оценки NOMA в конкретной технологии, такой как 5G или Wi-Fi 6, может существенно занижать производительность систем связи, использующих NOMA. Кроме того, с точки зрения системного уровня, более важным показателем является частота ошибок приема кадра (англ.: frame error rate, FER), а не частота битовых ошибок (англ.: bit error rate, BER). Однако в вышеупомянутых беспроводных технологиях связь между BER и FER не является явной [19]. Дополнительно, существующие аналитические исследования [14–16] ограничены рассмотрением только действительной части модуляционных символов в предположении, что действительная и мнимая части статистически независимы. Но на практике фазовый шум, присутствующий в реальных устройствах, нарушает это предположение. Фазовый шум, вызванный случайными флуктуациями фазы, проявляется в виде вращения символов в комплексной плоскости сигнального созвездия. Поэтому для более точного анализа NOMA необходимо рассматривать действительную и мнимую части символов вместе. Фазовый шум также может снижать эффективность NOMA [20] в Wi-Fi, поэтому разрабатываются специальные методы, позволяющие ослабить негативный эффект фазового шума, например, вращение сигнальных созвездий [21].

Несмотря на наличие большого числа исследований по NOMA, большинство посвящено изолированному исследованию NOMA в Wi-Fi, без учета других существенных аспектов функционирования современного Wi-Fi. Действительно, с одной стороны, экспериментальное прототипирование ограничено трудностями внедрения и затратами на разработку. С другой стороны, существующие аналитические исследования проводятся в соответствии с идеализированными предположениями, несовместимыми с реальными устройствами, или по построению неприменимы для моделирования системного уровня напрямую. Все это приводит к отсутствию реалистичных масштабных исследований на системном уровне NOMA в Wi-Fi.

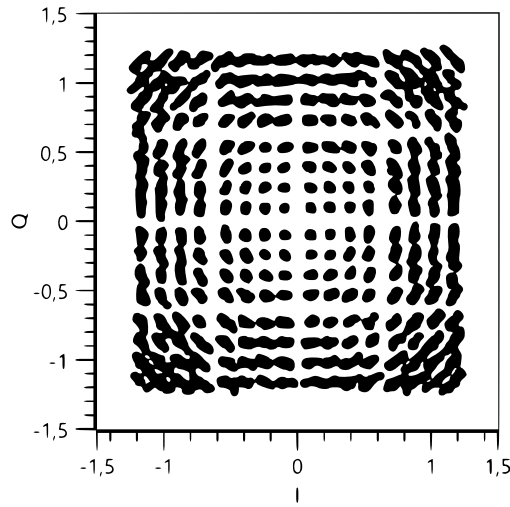
### 3. МОДЕЛЬ ОШИБКИ

#### *3.1. Параметризация модели ошибок*

Определим набор параметров, характеризующих прием NOMA-кадров. Для этого проанализируем сигнальные созвездия, полученные на прототипе приемопередатчика NOMA, представленного в статье [22].

Прототип реализует SC и PIC с помощью программно-определяемого радио. Его программная часть основана на библиотеке LabVIEW 802.11 Application Framework. NOMA-кадры с заданными параметрами формируются на передатчике NOMA. Размер кадров составляет 1500 байт, что соответствует максимальному размеру кадра в технологии Ethernet. В качестве помехоустойчивого кода используются двоичные сверточные коды. Разрядности дискретизации сигнала приемником и передатчиком составляют 16 бит для действительной и мнимой частей символов модуляции. Эти кадры передаются по проводному соединению на приемник NOMA, где декодируются алгоритмом Витерби со следующими параметрами: 8 бит для логарифмического отношения правдоподобия, 90 бит памяти. Передача по проводному соединению выбрана

затем, чтобы исключить влияние помех от других передач Wi-Fi, частотную избирательность и быстрые затухания в канале. Уровень шума составляет  $-92$  дБм.



**Рис. 1.** Сигнальное созвездие NOMA-кадра. Основной и вложенный кадры модулируются с помощью КАМ (квадратично-амплитудной модуляции) порядка 16.

Пример сигнального созвездия полученного NOMA-кадра представлен на рис. 1. Суперпозиционное кодирование основного и вложенного кадров приводит к разделению каждой области сигнального созвездия основного кадра на несколько областей, соответствующих сигнальным созвездиям вложенного кадра. В отличие от случая, когда помехой является только АБГШ, вложенный кадр делает размытую из-за шума область прерывистой и привносит в нее структуру. Сама структура определяется СКК вложенного кадра  $MCS_2$ , распределением мощности  $\gamma$  между двумя кадрами и отношением  $S$  общей мощности NOMA-кадра  $P_{\text{общ}}$  к шуму  $P_{\text{шум}}$ , измеренном на приемнике.  $S$  и  $\gamma$  измеряются в дБ. Эти три параметра и СКК основного кадра  $MCS_1$  определяют вероятность ошибки приема основного кадра. Пусть  $p$  обозначает частоту ошибок приема основного кадра, а  $P_{\text{основной}}$ ,  $P_{\text{вложенный}}$  — мощности кадров основного и вложенного кадров соответственно на приемнике. В разработанной модели рассматривается только прием основного кадра, поскольку предполагается, что вложенный кадр принимается как обычный кадр Wi-Fi. Такое предположение соответствует алгоритму приема NOMA-кадра, при котором вложенный кадр отбрасывается, если прием основного кадра оказывается неудачным. Следовательно, ошибки PIC или SIC не моделируются. Таким образом, дальнейшая цель состоит в построении для каждой пары  $MCS_1$  и  $MCS_2$  функции  $p$  от двух переменных:

$$p = p(S, \gamma), \quad (1)$$

где

$$S = \frac{P_{\text{общ.}}}{P_{\text{шум}}}, \quad \gamma = \frac{P_{\text{основной}}}{P_{\text{вложенный}}}.$$

В эксперименте значение  $MCS_1$  меняется от 0 до 7 включительно, этим индексам соответствуют СКК, заданные в таблице 1. Рассматриваются только четные индексы для  $MCS_2$ , т.е. СКК с различными размерами сигнального созвездия и минимальной при этом скоростью

Таблица 1. Сочетания СКК стандарта 802.11a/g

Номер СКК	Модуляция	Скорость кода
0	BPSK	1/2
1	BPSK	3/4
2	QPSK	1/2
3	QPSK	3/4
4	16QAM	1/2
5	16QAM	3/4
6	64QAM	2/3
7	64QAM	3/4

кода, поскольку в отличие от созвездия скорость кода не влияет на помехи от вложенного кадра. В частности, рассматриваются модуляции от двоичной фазовой манипуляции (англ.: binary phase-shift keying, BPSK) и квадратурной фазовой манипуляции (англ.: quadrature phase-shift keying, QPSK) до квадратурной амплитудной модуляции (англ.: quadrature amplitude modulation, QAM) 64-го порядка. Модуляции более высоких порядков, которые используются в стандарте 802.11ac и более поздних дополнениях, в данной работе не рассматриваются из-за высоких требований к отношению мощности сигнала к мощности шума (англ.: signal to noise ratio, SNR) для их применения и того факта, что общая мощность передачи распределяется между основным и вложенным кадрами, что приводит к снижению SNR для обоих кадров. Например, в случае модуляции 256QAM требуется  $SNR = 29$  дБ [23].  $S$  и  $\gamma$  изменяются в диапазонах  $I_1 := [7; 8...29; 30]$  дБ и  $I_2 := [0.1; 0.5; 1; 2...29; 30]$  дБ соответственно. FER измеряется в течение двух секунд для каждого набора параметров. После измерения FER, получим  $\hat{p}$  для дискретного множества. Для аппроксимации функции  $p$  из формулы (1) используются интерполяция и экстраполяция функции двух переменных.

### 3.2. Интерполяция

Для оценки вероятности приема при значениях  $S, \gamma$ , не входящих в  $I_1$  или  $I_2$ , выбрана билинейная интерполяция как компромисс между вычислительной сложностью и точностью. Для каждой точки  $(S, \gamma)$  такой, что  $\min(I_1) < S \leq \max(I_2)$  и  $\min(I_2) < \gamma < \max(I_2)$  определяется содержащий ее прямоугольник с узловыми точками  $x_1, x_2 \in I_1$  и  $y_1, y_2 \in I_2$ . Билинейная интерполяция локально внутри прямоугольника аппроксимирует FER в следующей форме:

$$p(S, \gamma) = a_{00} + a_{10}S + a_{01}\gamma + a_{11}S\gamma,$$

где коэффициенты  $a_{00}, a_{10}, a_{01}$  и  $a_{11}$  определяются из условий, что значения функции, вычисленные по этой форме в узловых точках, равны экспериментальным значениям, т. е.,

$$\begin{aligned} p(x_1, y_1) &= \hat{p}(x_1, y_1), \\ p(x_1, y_2) &= \hat{p}(x_1, y_2), \\ p(x_2, y_1) &= \hat{p}(x_2, y_1), \\ p(x_2, y_2) &= \hat{p}(x_2, y_2). \end{aligned}$$

### 3.3. Экстраполяция

Если  $x$  или  $y$  находятся вне области измерений в эксперименте, используется экстраполяция. Например, если  $x > \max(I_1) = 30$  дБ и  $y \in I_2$ , то используется процедура, описанная в подразделе 3.2, с тем только отличием, что  $x_2$  равно  $\max(S) = 30$  дБ. Выбор экстраполяции мотивирован тем фактом, что около  $\max(I_1)$  и  $\max(I_2)$  функция  $p(S, \gamma)$  вырождается в функцию одной

переменной. Например, в результате измерений получено, что  $\hat{p}(S, 30) \approx \hat{p}(S, 28) \approx \hat{p}(S, 26)$ . Таким образом, экстраполяция описывается формулой:

$$p(S, \gamma) = p(\max(\min(S, 30), 7), \max(\min(\gamma, 30), 0, 1)).$$

#### 4. ТОЧНОСТЬ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ

В этом разделе оценивается производительность NOMA в Wi-Fi на системном уровне с помощью разработанной модели. Результаты сравниваются с получаемыми с помощью моделей ошибок при приеме кадров, часто используемых в литературе. Хотя эти модели были разработаны для анализа приема обычных кадров Wi-Fi, в качестве упрощения они часто применяются и для анализа приема NOMA-кадров [4, 11, 12]. В частности, рассмотрим такие хорошо зарекомендовавшие себя модели, как NIST и TGax, являющиеся популярными вариантами в имитационном моделировании Wi-Fi [10]. Модель NIST основана на теоретической оценке вероятности успешного приема кадров в присутствии АБГШ. Напротив, TGax построена на основе интерполяции табличных значений, полученных по результатам моделирования кодирования, передачи и последующем декодировании кадров в Matlab WLAN Toolbox [13]. При построении TGax применяется модель частотно-избирательного канала, но экспоненциальное эквивалентное отображение SNR на поднесущих настраивается таким образом, чтобы зависимость доли ошибочно принятых кадров от эффективного SNR была такой же, как в случае плоского затухания в канале с АБГШ [10]. Чтобы использовать NIST и TGax для имитационного моделирования NOMA на системном уровне, повторим подход, изложенный в литературе [4, 11, 12], и предположим, что помехи от вложенного кадра являются дополнительным источником АБГШ. С этой точки зрения определим эффективный SNR,  $SNR_{эфф.}$ , который может быть вычислен из  $S$  и  $\gamma$ , выраженных в линейном масштабе, следующим образом:

$$SNR_{эфф.} = \frac{\alpha S}{(1 - \alpha) \cdot S + 1}, \quad \alpha = \frac{P_{основной}}{P_{основной} + P_{вложенный}} = \frac{\gamma}{\gamma + 1}.$$

Рис. 2 изображает зависимость FER основного кадра от  $SNR_{эфф.}$  для трех моделей: разработанной, NIST и TGax. Основной кадр модулируется и передается на СКК4. Для TGax используется формат кадра 802.11ax и сверточный код с кодовой скоростью  $\frac{1}{2}$ . Обеим моделям, NIST и TGax, соответствует только одна кривая, так как  $SNR_{эфф.}$  является независимой переменной и учитывает только АБГШ. Напротив, для разработанной модели можно независимо варьировать  $MCS_2$  и  $\gamma$ , устанавливая таким образом величину и характер помех от вложенного кадра отдельно, как следствие, на графике представлено семейство кривых, параметризованное  $MCS_2$  и  $\gamma$ . Результаты, показанные на рис. 2, получены при передаче вложенного кадра либо на СКК0, либо на СКК2, что соответствует модуляциям BPSK и QPSK. Максимальная  $\gamma$  выбирается таким образом, чтобы при таком значении FER для вложенного кадра не превышал 0,1 при наличии только АБГШ и использовании СКК0. Сравним сначала разработанную модель с NIST и TGax, а затем опишем результаты, полученные на разработанной модели в контексте производительности сети Wi-Fi.

При больших значениях  $\gamma$  помехи вложенного кадра по сравнению с АБГШ незначительны, и ожидается, что разработанная модель должна работать близко к приему обычных кадров Wi-Fi, т.е. к NIST или к TGax. Однако, даже когда  $\gamma$  достигает 30 дБ, кривая FER отличается от кривых FER NIST и TGax. Что касается NIST, то расхождение можно объяснить, рассмотрев теоретические предположения, в соответствии с которыми построена модель NIST.

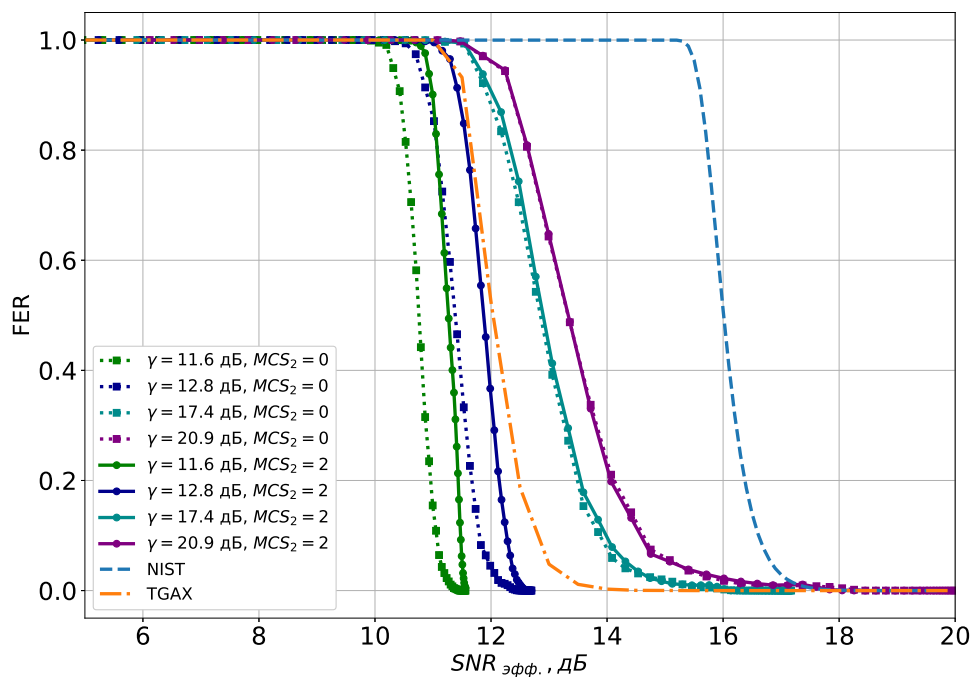


Рис. 2. Сравнение FER основного кадра.

Как отмечается в работе [10], NIST дает довольно завышенные оценки FER по сравнению с измерениями на устройствах Wi-Fi. Это может быть объяснено двумя факторами [10]. Во-первых, модель NIST использует верхнюю границу битовой ошибки после декодирования по алгоритму Витерби, а во-вторых, после вычисления вероятности битовой ошибки оценивается вероятность ошибки для каждого кадра в предположении, что ошибки в разных битах кадра распределены одинаково и независимо. Хотя модель TGAX построена без этих упрощений, поскольку основана на численных результатах моделирования кодирования, передачи и декодирования в Matlab WLAN Toolbox, она по-прежнему не учитывает аппаратные неидеальности (например, ошибку оценки смещения частоты, фазовый шум) реальных устройств. Несмотря на то, что их можно учесть в Matlab WLAN Toolbox, они не были реализованы при построении модели ошибок TGAX. Кроме того, такая реализация также потребовала бы экспериментальных измерений для выбора характерной величины аппаратных неидеальностей.

Обобщим, к чему приводит приравнивание помехи от вложенного кадра к АБГШ с точки зрения моделирования сетей Wi-Fi на системном уровне. Рассмотрим диаграмму сигнального созвездия вложенных кадров и АБГШ равных мощностей. В силу равенства мощностей вложенного кадра и АБГШ их диаграммы сигнальных созвездий будут представлять два множества равных диаметров. Но вложенный кадр вызывает меньшие искажения, и его множество имеет меньшую площадь на диаграмме сигнального созвездия. По мере увеличения порядка модуляции вложенного кадра созвездие становится более плотным, и разница исчезает. Таким образом, при заданном  $SNR_{эфф.}$  FER основного кадра, соответствующая модуляции BPSK вложенного кадра, ниже, чем та же FER при использовании QPSK ( $MCS_2 = 0$  и  $MCS_2 = 2$  соответственно). Как видно из рис. 2, FER зависит от структуры вложенного кадра (BPSK × QPSK), поэтому результаты подтверждают качественный предварительный анализ, приведенный ранее. В целом, можно сделать вывод, что предположение о том, что помехи от

вложенного кадра эквивалентны АБГШ той же мощности, приводит к завышению требований к SNR. Например, уровни 0,1 FER для  $MCS_2 = 0$ ,  $\gamma = 11,4$  дБ и  $MCS_2 = 0$ ,  $\gamma = 20,9$  дБ отличаются примерно на 4 дБ.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на обширные исследования NOMA, существующие модели приема кадров либо слишком упрощены, либо неприменимы к моделированию NOMA на системном уровне в Wi-Fi напрямую без внесения неточностей. Чтобы сделать это моделирование более точным, в этой статье представлена модель ошибки приема кадров. Разработанная модель включает в себя зависимость вероятности ошибок приема основного кадра от распределения мощности между основным и вложенным кадрами, общего отношения мощностей сигнала к шуму, а также СКК обоих кадров. Эта зависимость построена на основе данных, полученных на прототипе передатчика NOMA. Обнаружено, что упрощенный подход к моделированию помех от вложенного кадра, состоящий в приравнивании его влияния к АБГШ той же мощности приводит к недооценке потенциального преимущества от использования NOMA в Wi-Fi. Эта недооценка вызвана завышением требований к отношению мощностей сигнала к шуму для заданной вероятности ошибки приема основного кадра которая зависит не только от мощности передачи вложенного кадра, но также и от структуры помех, создаваемых вложенным кадром. Ограничением этого исследования является предположение о том, что основной кадр должен быть декодирован без ошибок, если станция должна принять вложенный кадр. Следовательно, возможным направлением будущих исследований могла бы стать модель приема NOMA-кадра на системном уровне, которая учитывает неидеальные SIC или PIC.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Galati Giordano, G. Geraci, M. Carrascosa, and B. Bellalta, "What Will Wi-Fi 8 Be? A Primer on IEEE 802.11 bn Ultra High Reliability," *arXiv e-prints*, pp. arXiv-2303, 2023.
2. Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, Z. Ding, A. Nallanathan, and L. Hanzo, "Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 12, pp. 2347–2381, 2017.
3. E. Khorov, A. Kureev, I. Levitsky, and I. F. Akyildiz, "Prototyping and Experimental Study of Non-Orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks," *IEEE Network*, vol. 34, no. 4, pp. 210–217, 2020.
4. P. K. Sangdeh, H. Pirayesh, Q. Yan, K. Zeng, W. Lou, and H. Zeng, "A practical downlink NOMA scheme for wireless LANs," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 4, pp. 2236–2250, 2020.
5. B. S. Pavan and V. Harigovindan, "Improving the Aggregate Utility of IEEE 802.11 WLAN Using NOMA," in *Advanced Network Technologies and Intelligent Computing: First International Conference, ANTIC 2021, Varanasi, India, December 17–18, 2021, Proceedings*. Springer, 2022, pp. 168–176.
6. T. Manglayev, R. C. Kizilirmak, and Y. H. Kho, "Comparison of parallel and successive interference cancellation for non-orthogonal multiple access," in *2018 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet)*, 2018, pp. 74–77.
7. R. Zlobin, A. Kureev, E. Khorov, "A prototype of uplink NOMA wi-fi with successive interference cancellation," *Proceedings of the Twenty-Third International Symposium on Theory, Algorithmic Foundations, and Protocol Design for Mobile Networks and Mobile Computing*. – 2022. – С. 291-292.
8. G. Korolev, A. Kureev, A. Lyakhov, E. Khorov (2022). Performance Evaluation of Uplink Non-Orthogonal Multiple Access with Reservation Signals in Wi-Fi Networks. *Journal of Communications Technology and Electronics*. - 2022, T. 67. С 1513-1520.
9. Y. Liu, W. Yi, Z. Ding, X. Liu, O. A. Dobre, N. Al-Dhahir, Developing NOMA to Next Generation Multiple Access: Future Vision and Research Opportunities, *IEEE Wireless Communications*, 2022, T. 29, ном. 6, С. 120-127.



10. R. Patidar, S. Roy, T. R. Henderson, and A. Chandramohan, "Link-to-system mapping for ns-3 Wi-Fi OFDM error models," in *Proceedings of the 2017 Workshop on ns-3*, 2017, pp. 31–38.
11. M. F. Uddin, "Throughput performance of NOMA in WLANs with a CSMA MAC protocol," *Wireless Networks*, vol. 25, no. 6, pp. 3365–3384, 2019.
12. S. Tutelian and E. Khorov, "Nonorthogonal Multiple Access for Servicing the Internet of Things and Web Traffic in Wi-Fi Networks," *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 65, pp. 741–749, 2020.
13. Mathwork. 2023. WLAN System Toolbox. URL: <https://www.mathworks.com/help/wlan>.
14. J.-R. Garnier, A. Fabre, H. Farès, and R. Bonnefoi, "On the Performance of QPSK Modulation Over Downlink NOMA: From Error Probability Derivation to SDR-Based Validation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 66 495–66 507, 2020.
15. T. Assaf, A. J. Al-Dweik, M. S. E. Moursi, H. Zeineldin, and M. Al-Jarrah, "Exact Bit Error-Rate Analysis of Two-User NOMA Using QAM With Arbitrary Modulation Orders," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 12, pp. 2705–2709, 2020.
16. H. Yahya, E. Alsusa, and A. Al-Dweik, "Exact BER Analysis of NOMA With Arbitrary Number of Users and Modulation Orders," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 9, pp. 6330–6344, 2021.
17. H. Yahya, E. Alsusa, A. Al-Dweik *et al.*, "Error rate analysis of NOMA: Principles, survey and future directions," 2022.
18. X. Chen, "Coding in 802.11 wlans," September 2012. [Online]. Available: <https://mural.maynoothuniversity.ie/4217/>
19. A. G. Shapin, D. V. Kleyko, P. V. Krasheninnikov, and O. G. Melentyev, "An Algorithm for the Exact Packet Error Probability Calculation for Viterbi Decoding," in *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, 2018, pp. 282–287.
20. A.-A. A. Boulogeorgos, N. D. Chatzidiamantis, and G. K. Karagiannidis, "Non-Orthogonal Multiple Access in the Presence of Phase Noise," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 5, pp. 1133–1137, 2020.
21. E. Khorov, A. Kureev, I. Levitsky, and I. F. Akyildiz, "A Phase Noise Resistant Constellation Rotation Method and Its Experimental Validation for NOMA Wi-Fi," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 4, pp. 1346–1354, 2022.
22. E. Khorov, A. Kureev, I. Levitsky, and I. F. Akyildiz, "Prototyping NOMA constellation rotation in Wi-Fi," in *IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. IEEE, 2020, pp. 1332–1333.
23. MCS Table by Keith Parsons at WirelessLAN Professional. Accessed: 8th February, 2023. [Online]. Available: <https://d2cpnw0u24fjm4.cloudfront.net/wp-content/uploads/802.11ac-VHT-MCS-SNR-and-RSSI.pdf>

## Experimentally Based Frame Error Model for Downlink NOMA in Wi-Fi

E.O. Endovitskiy, E.M. Khorov, A.A. Kureev

As multiple studies show, wireless networks, including Wi-Fi, benefit from the introduction of non-orthogonal multiple access (NOMA). A comprehensive assessment of this gain requires modeling at the system level, which, in turn, requires a fairly accurate estimation of the probability of receiving NOMA frames. The existing models of receiving NOMA frames either do not take into account the NOMA-frame structure, or operate at the bit reception level, which is why they cannot be directly used at the system

level. This article proposes a model of NOMA frame reception error based on empirical data obtained using the NOMA Wi-Fi prototype. The model makes possible to estimate the probability of successful reception of NOMA frames depending on the signal-code structures used, power distribution and the overall ratio of signal power to noise. In the article, the developed model is compared with the existing approach, which equates interference from NOMA transmission to additive white Gaussian noise and uses common models for receiving conventional Wi-Fi frames. The results show that the model can significantly improve the accuracy of evaluating the performance of NOMA Wi-Fi networks, and the existing simplified approach underestimates the benefits that NOMA gives.

**KEYWORDS:** Error model, MIMO, multiple access, NOMA, Wi-Fi