

Использование неортогонального множественного доступа для обслуживания веб-трафика и трафика Интернета вещей в сетях Wi-Fi¹

С.А. Тутельян*, Е.М. Хоров*,**

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

** *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*

Поступила в редколлегию 01.08.2019

Аннотация—В настоящее время многим устройствам требуется беспроводное подключение к Интернету, в то время как доступный частотный спектр ограничен. Неортогональный множественный доступ (non-orthogonal multiple access, NOMA) является технологией мультиплексирования, которая может значительно повысить спектральную эффективность и, тем самым, решить указанную проблему. В данной работе исследуется применение NOMA в сетях Wi-Fi с двумя типами трафика: веб-трафик и трафик Интернета вещей. Веб-трафик является одним из основных типов Интернет-трафика и состоит из относительно небольших потоков данных, которые должны быть быстро доставлены пользователям. Трафик Интернета вещей представляется очень короткими по сравнению с веб-трафиком потоками, однако этих потоков может быть довольно много из-за большого количества устройств Интернета вещей. В работе предложен алгоритм выделения ресурсов в сети Wi-Fi с использованием NOMA, учитывающий наличие трафика обоих типов, и исследована его эффективность с помощью имитационного моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Беспроводная сеть, Wi-Fi, неортогональный множественный доступ, Интернет вещей.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время количество различных устройств, использующих широкополосный доступ в Интернет, стремительно растет, а объем передаваемых данных значительно увеличивается. В то же время доступный частотный спектр ограничен, что может приводить к тому, что часть пользователей почти не будет обслуживаться. Одним из способов решения данной проблемы является повышение спектральной эффективности с помощью методов неортогонального множественного доступа (non-orthogonal multiple access, NOMA). NOMA позволяет передавать потоки данных нескольким пользователям одновременно в одной частотной полосе. В связи с этим повышается максимально возможное число пользователей в сети, при котором сеть не перегружается.

В работе [1] показано, как технология NOMA может быть использована в сетях Wi-Fi. Количество пользователей, подключенных к одной точке доступа, может быть довольно большим, а передающиеся потоки данных могут принадлежать различным типам трафика. В таком случае NOMA позволяет эффективнее использовать доступные каналные ресурсы и тем самым быстрее передать все потоки. Одним из основных типов трафика, передающегося в сетях Wi-Fi, является загрузка веб-страниц. В этом случае время передачи страницы является основным показателем производительности: пользователям желательно загружать новые

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-20077 мол_а_вед

веб-страницы с сервера как можно быстрее. Веб-страница имеет размер около 1-3 МБ, и с увеличением количества одновременных запросов сеть может перестать удовлетворять требованиям всех пользователей. В данном случае NOMA помогает обеспечить короткое время доставки данных.

Другим типом трафика, рассматриваемым в данной работе, является трафик Интернета вещей, так как сети Wi-Fi часто используются для обслуживания устройств Интернета вещей. В частности, поддержке трафика Интернета вещей посвящены стандарты Wi-Fi 802.11ah и 802.11ba. Кроме того, основной стандарт 802.11ax также нацелен на поддержку устройств Интернета вещей. Трафик Интернета вещей состоит из очень коротких потоков, однако из-за большого количества устройств Интернета вещей нагрузка на сеть может быть большой. Если в сети присутствуют также пользователи, загружающие веб-трафик, то совокупный трафик устройств Интернета вещей может значительно увеличить длительность загрузки веб-страниц. В таких условиях NOMA может уменьшить влияние, оказываемое устройствами Интернета вещей, на других пользователей.

В данной работе используется разновидность NOMA, при которой мультиплексирование сигналов, предназначенных разным пользователям, происходит с помощью назначения сигналам различных уровней мощностей, благодаря чему получатели способны декодировать все принятые одновременно сигналы последовательно, начиная с самых сильных. В работе рассматривается случай только двух одновременно передаваемых сигналов. Это ограничение вызвано сложностью реализации NOMA для поддержки большего количества потоков и меньшим увеличением производительности дополнительных потоков, как было отмечено в нескольких работах [2], [3].

Приведем упрощенное описание схемы передачи двух сигналов с помощью NOMA. Пусть точке доступа требуется передать двум пользователям: пользователю с хорошими канальными условиями и пользователю с плохими канальными условиями. Вся доступная мощность делится на две неравные части: большая часть предоставляется устройству с плохими канальными условиями (устройство получает *сильный* сигнал), а оставшаяся часть выделяется устройству с хорошим каналом (*слабый* сигнал). Получатель с плохими канальными условиями декодирует собственный сигнал, рассматривая *слабый* сигнал в качестве шума. Получатель с хорошим каналом также сначала декодирует *сильный* сигнал. Затем производится операция последовательного подавления помех (successive interference cancellation, SIC): устройство вычитает декодированный *сильный* сигнал из общего принятого сигнала. В результате *слабый* сигнал может быть декодирован без интерференции со стороны *сильного* сигнала.

Предполагается, что устройства Интернета вещей должны быть простыми, и поэтому не поддерживают описанное последовательное декодирование сигналов. Однако, как показано в работе [1], применение технологии NOMA в Wi-Fi можно сделать совместимым с обычными Wi-Fi устройствами: получатель *сильного* сигнала может не поддерживать передачи с помощью NOMA. В связи с этим можно использовать неортогональный доступ для совместной передачи веб-страницы и потока Интернета вещей.

Для эффективной работы сети, использующей технологию NOMA, необходимо решить задачу выделения ресурсов: выбрать пару устройств на передачу и разделить между ними доступную мощность. В литературе данная задача исследуется в основном для сотовых сетей. Обычно в качестве критерия оптимизации рассматриваются суммарная пропускная способность или метрика Proportional Fair (PF) [4–8]. В [4] предлагается основанный на оптимизации по PF подход к выбору пар устройств на передачу для повышения производительности пользователей на границе соты. Авторы [6] приводят оптимальное решение задачи максимизации пропускной способности с ограничениями качества обслуживания для каждого пользователя. В работе [8] исследуются различные взвешенные методы PF при использовании NOMA. Пред-

ложенные взвешенные метрики позволяют достичь справедливого распределения ресурсов при соблюдении различных требований к качеству обслуживания.

Недостатком указанных работ является упрощенная модель сети. Например, в сети всегда есть данные на передачу всем пользователям, а в качестве скорости передачи данных используются оценки по Шеннону, которые являются завышенными. В данной работе исследуется более сложная модель сети с большим количеством пользовательских устройств, загружающих веб-страницы, и устройств Интернета вещей. Предложен подход к распределению ресурсов на основе метрики PF, учитывающий наличие трафика обоих типов.

В разделе 2 представлена организация системы, использующей NOMA для одновременных передач двух потоков. В разделе 3 исследуется потенциал применения NOMA для передач потоков Интернета вещей. В разделе 4 представлены результаты имитационного моделирования. Раздел 5 содержит заключение.

2. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

2.1. Передача сигналов

В работе предполагается, что NOMA может использоваться для передачи не более двух сигналов. Случай передачи только одного сигнала назовем ортогональным множественным доступом (orthogonal multiple access, ОМА). Пусть P – доступная мощность на точке доступа. В случае ОМА сигналу выделяется вся доступная мощность. В случае с использованием NOMA доступная мощность делится на две части p_1 и p_2 для устройств s_1 и s_2 соответственно:

$$\begin{aligned} p_1 &= xP, \\ p_2 &= (1-x)P, \end{aligned}$$

где $x \in [0, 1]$. Не ограничивая общности, каналные условия устройства s_2 хуже, чем каналные условия устройства s_1 . Поэтому для успешного декодирования сигналов необходимо $p_1 \leq p_2$ и $x \leq 0,5$, то есть устройству s_1 предназначен менее мощный (*слабый*) сигнал, а устройству s_2 – (*сильный*) сигнал. При получении общего сигнала s_2 декодирует свой сигнал, интерпретируя *слабый* сигнал как шум. s_1 также сначала декодирует *сильный* сигнал, вычитает декодированный сигнал из общего принятого сигнала, затем декодирует *слабый* сигнал без интерференции со стороны *сильного* сигнала.

В работе делаются следующие предположения о декодировании *слабого* и *сильного* сигналов:

- При декодировании *слабого* сигнала операция SIC не вносит дополнительных ошибок, то есть вычитание *сильного* сигнала производится идеально.
- При декодировании *сильного* сигнала интерференция от *слабого* сигнала считается гауссовой.

В таком случае отношения сигнал/шум для *слабых* (SNR^{weak}) и *сильных* (SNR^{strong}) сигналов выражаются следующим образом:

$$SNR^{weak}(x, \rho_1) = \frac{xP\eta_1}{\sigma^2} = x\rho_1, \quad (1)$$

$$SNR^{strong}(x, \rho_2) = \frac{(1-x)P\eta_2}{xP\eta_2 + \sigma^2} = \frac{(1-x)\rho_2}{x\rho_2 + 1}, \quad (2)$$

$$\rho_i = \frac{P\eta_i}{\sigma^2}, \quad (3)$$

где η_1 и η_2 – коэффициенты затухания сигнала устройств s_1 и s_2 соответственно, σ^2 – мощность аддитивного белого гауссова шума, ρ_i – отношение сигнал/шум в случае ОМА: вся мощность точки доступа направляется только одному сигналу. Стоит отметить, что выражение (3) является частным случаем (2) при $x = 0$ и частным случаем (1) при $x = 1$.

Таблица 1. Скорости передачи и требования на мощность принимаемого сигнала для каждой СКК, стандарт 802.11ac, канал 20 МГц

#	СКК	Скорость передачи, Мбит/с	Мин. мощность принимаемого сигнала, дБм	Мин. сигнал/шум, дБ
0	BPSK, 1/2	6.5	-82	4
1	QPSK, 1/2	13	-79	7
2	QPSK, 3/4	19.5	-77	9
3	16-QAM, 1/2	26	-74	12
4	16-QAM, 3/4	39	-70	16
5	64-QAM, 2/3	52	-66	20
6	64-QAM, 3/4	58.5	-65	21
7	64-QAM, 5/6	65	-64	22
8	256-QAM, 3/4	78	-59	27
9	256-QAM, 5/6	86.7	-57	29

В таблице 1 показаны требования к минимальному уровню мощности принимаемого сигнала для сигнально-кодовых конструкций (СКК), согласно стандарту 802.11ac. Требования на отношения сигнал/шум посчитаны при мощности шума = -86 дБм. В работе предполагается, что передача на СКК c успешна, если отношение сигнал/шум передаваемого сигнала удовлетворяет следующему требованию:

$$SNR_r \geq SNR_{min}(c),$$

где $SNR_{min}(c)$ – минимальное значение отношения сигнал/шум для успешной передачи из таблицы 1, SNR_r – отношение сигнал/шум на получателе.

В данной работе предполагается, что точке доступа известны каналные условия всех станций. Для этого точка доступа может периодически запрашивать информацию о канале у всех активных станций. Таким образом, точка доступа может вычислять правильные значения отношений сигнал/шум по выражениям (1) и (2).

2.2. Сценарий

В работе рассматривается сеть Wi-Fi с одной точкой доступа. Точка доступа может передавать данные с помощью NOMA или ОМА. В случайные моменты времени (например, согласно экспоненциальному распределению) точка доступа порождает конечные потоки данных f_i , которые должны быть переданы на пользовательские станции. Поток может быть как потоком Интернета вещей, так и веб-поток. Станции равномерно распределены в круге, центром которого является точка доступа, и каждый поток должен быть доставлен на свою станцию.

На рис. 1 представлена схема передачи с использованием NOMA. Точка доступа выбирает пару потоков A и B и осуществляет их совместную передачу. После этого точка доступа должна получить два пакета АСК, причем для обеспечения обратной совместимости пользователь, выполняющий SIC, посылает пакет АСК вторым. После этого точка доступа снова выбирает потоки на передачу.

Для выполнения передачи точка доступа должна выбрать поток или пару потоков и выделить для них каналные ресурсы: СКК и мощности передачи. В случае ОМА мощность передачи равна P , а СКК является максимально возможной для этого потока, которая определяется по таблице 1. Например, для потока с отношением сигнал/шум $\rho = 18$ дБ точка доступа выбирает СКК #4.

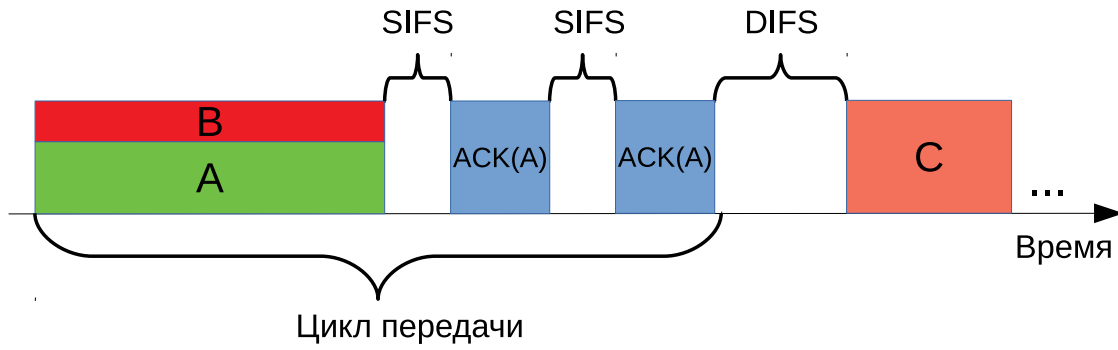


Рис. 1. Передача с использованием NOMA

При использовании NOMA мощности передачи p_1 и p_2 , $p_1 \leq p_2$, определяются значением x . По данному значению коэффициента разделения мощностей x можно определить отношения сигнал/шум для *слабого* и *сильного* сигнала по выражениям (1) и (2). Полученные отношения сигнал/шум определяют доступные пары СКК для передачи по требованиям из таблицы 1. Аналогично, по данной паре СКК можно определить отношение x (или показать, что для данной пары нет такого значения x). Таким образом, точке доступа для заданной пары станций достаточно определить либо пару СКК, либо отношение мощностей x .

2.3. Выделение ресурсов

Для выполнения передачи точка доступа выбирает один или два потока, мощности передачи и СКК. Как было указано ранее, в рассматриваемой системе для передачи с помощью NOMA достаточно выбрать пару потоков и пару СКК для них. Пусть задана функция полезности $\lambda(f, c)$, где f – поток, c – выбранная СКК, которая показывает качество выделения ресурсов. $\lambda(f, c) = 0$, если успешная передача данному потоку на СКК c невозможна. Задача нахождения лучшего выделения ресурсов может быть записана следующим образом:

$$\max_{\substack{f_1, f_2 \in F \\ c_1, c_2 \in C}} \{\lambda(f_1, c_1) + \mathbb{I}(f_1 \neq f_2)\lambda(f_2, c_2)\}, \quad (4)$$

где F – множество всех активных потоков, C – множество всех СКК. Случай $f_1 = f_2$ относится к передаче потока без использования NOMA.

В данной работе рассмотрена функция Proportional Fair (PF):

$$\lambda(f, c) = \frac{r(c)}{Q(f)},$$

где $r(c)$ – скорость передачи данных на СКК c , $Q(f)$ – средняя скорость обслуживания потока f . Выбор PF в качестве функции полезности обусловлен тем, что оптимизация данной функции позволяет одновременно увеличивать пропускную способность и в то же время справедливо распределить ресурсы: если какой-то поток получает много ресурсов, его средняя скорость $Q(f)$ возрастает, и значение $\lambda(f, c)$ уменьшается, что позволяет другим потокам получить свою долю ресурсов.

3. ПРИМЕНЕНИЕ NOMA ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

В работе рассматривается трафик двух типов: трафик Интернета вещей и веб-трафик. Как ранее было отмечено, устройства Интернета вещей из-за необходимости быть простыми не

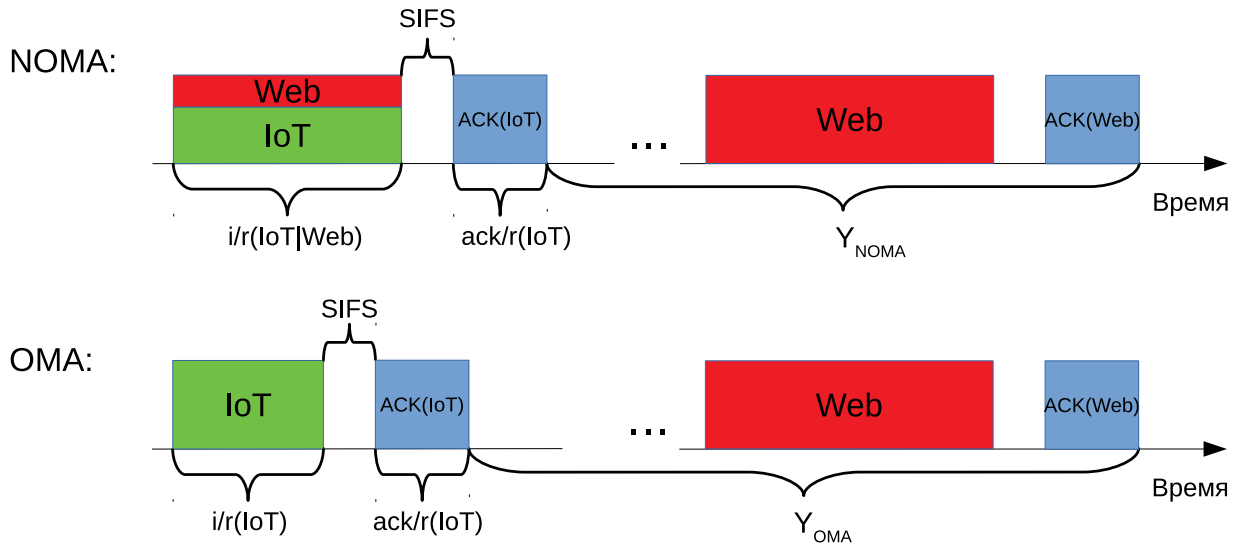


Рис. 2. Передача потока Интернета вещей вместе с веб-поток

поддерживают SIC. В связи с этим потоки Интернета вещей не могут совместно передаваться при использовании NOMA. Таким образом, в передачах с использованием NOMA могут участвовать либо поток Интернета вещей и веб-поток, либо два веб-потока. Поток Интернета вещей намного меньше веб-потока по объему передаваемых данных, причем весь поток Интернета вещей обычно может быть передан за одну передачу.

Рассмотрим следующий модельный пример. Пусть требуется передать поток Интернета вещей и веб-поток. Поток Интернета вещей может быть передан двумя способами: с использованием NOMA совместно с веб-поток или посредством OMA. Для снижения накладных расходов при использовании NOMA устройство, принимающее веб-поток, не отправляет пакет ACK. Информация о доставке части данных веб-потока, переданных совместно с потоком Интернета вещей, передается в следующем пакете ACK. На рис. 2 показана схема передачи потока Интернета вещей с помощью NOMA и OMA; в таблице 2 приводится список используемых обозначений.

Таблица 2. Используемые обозначения

Обозначение	Определение
IoT	Поток Интернета вещей.
Web	Веб-поток.
i	Количество бит в потоке Интернета вещей.
w	Количество бит в веб-потоке, причем $w \gg i$.
$r(IoT), r(Web)$	Скорости передач потока Интернета вещей и веб-потока соответственно; они зависят от значения мощности на точке доступа P_{max} и канальных условий пользователей.
$r(IoT Web)$	Скорость передачи потока Интернета вещей при совместной передаче с веб-поток.
$r(Web IoT)$	Скорость передачи веб-потока при совместной передаче с потоком Интернета вещей; $r(IoT Web)$ и $r(Web IoT)$ зависят также от коэффициента разделения мощности x .
ack	Количество бит в пакете ACK.
Y_{NOMA}, Y_{OMA}	Время, за которое передается веб-поток после передачи потока Интернета вещей при использовании NOMA и OMA соответственно.
T_{NOMA}, T_{OMA}	Длительность передачи веб-потока и потока Интернета вещей при использовании NOMA и OMA соответственно.

Для рассматриваемого примера можно вычислить суммарную длительность передачи обоих потоков:

$$T_{NOMA} = \frac{i}{r(IoT|Web)} + SIFS + \frac{ack}{r(IoT)} + Y_{NOMA},$$

$$T_{OMA} = \frac{i}{r(IoT)} + SIFS + \frac{ack}{r(IoT)} + Y_{OMA}.$$

Отметим, что $Y_{NOMA} < Y_{OMA}$, так как некоторая часть бит веб-потока была передана с потоком Интернета вещей. При этом:

$$Y_{NOMA} - Y_{OMA} = \frac{\frac{i}{r(IoT|Web)}r(Web|IoT)}{r(Web)},$$

где $\frac{i}{r(IoT|Web)}$ – длительность совместной передачи, $\frac{i}{r(IoT|Web)} \cdot r(Web|IoT)$ – количество бит веб-потока, переданное за это время. Тогда:

$$\Delta T = T_{NOMA} - T_{OMA} = \frac{i}{r(IoT|Web)} - \frac{i}{r(IoT)} - \frac{i \cdot r(Web|IoT)}{r(Web)r(IoT|Web)} =$$

$$i \cdot \frac{r(IoT)r(Web) - r(Web)r(IoT|Web) - r(IoT)r(Web|IoT)}{r(IoT)r(Web)r(IoT|Web)}. \quad (5)$$

Таким образом, если числитель (5) меньше нуля, то при увеличении размера потока Интернета вещей i суммарное время передачи при использовании NOMA будет меньше, чем при использовании OMA. Рассмотрим предельные значения пропускной способности C для канала с шумами:

$$C = F \log(1 + SNR),$$

где F – ширина полосы частот канала, SNR – отношение сигнал/шум. Тогда:

$$r(IoT) \leq F \log(1 + a),$$

$$r(Web) \leq F \log(1 + b),$$

где $a > 0$, $b > 0$ – базовые отношения сигнал/шум для потока Интернета вещей и веб-потока соответственно, причем $a < b$, так как поток Интернета вещей при использовании NOMA может передаваться только устройству с худшими канальными условиями. В этом случае отношение сигнал/шум *слабого* сигнала перемножается на коэффициент разделения мощности x , $0 < x \leq 0.5$, который используется для этого сигнала. Для *сильного* сигнала *слабый* сигнал считается шумом, и в результате скорости совместных передач будут следующими:

$$r(Web|IoT) \leq F \log(1 + xb),$$

$$r(IoT|Web) \leq F \log\left(1 + \frac{(1-x)a}{1+xa}\right) = F \log\left(\frac{1+a}{1+xa}\right). \quad (6)$$

Подставим выражения (6) в числитель (5):

$$r(IoT)r(Web) - r(Web)r(IoT|Web) - r(IoT)r(Web|IoT) \leq$$

$$F^2(\log(1+a)\log(1+b) - \log(1+b)\log\left(\frac{1+a}{1+xa}\right) - \log(1+a)\log(1+xb)) =$$

$$F^2(\log(1+b)\log(1+xa) - \log(1+a)\log(1+xb)). \quad (7)$$

Опустим далее ширину полосы F в случаях, когда данное значение не влияет на рассуждения. Верно следующее утверждение о знаке выражения (7).

Теорема 1. Если $0 < a < b$, $0 < x < 1$, то:

$$Z(a, b, x) = \log(1 + b) \log(1 + xa) - \log(1 + a) \log(1 + xb) < 0.$$

Доказательство. Перейдем к эквивалентному утверждению:

$$Z(a, b, x) < 0 \iff L(a, b, x) = \frac{\log(1 + xa) \log(1 + b)}{\log(1 + a) \log(1 + xb)} < 1.$$

Положим $f(b, x) = \frac{\log(1+b)}{\log(1+xb)}$. Рассмотрим производную f'_b :

$$f'_b = \frac{\frac{\log(1+xb)}{1+b} - \frac{x \log(1+b)}{1+xb}}{\log^2(1+xb)} = \frac{(1+xb) \log(1+xb) - x(1+b) \log(1+b)}{(1+b)(1+xb) \log^2(1+xb)}.$$

При этом:

$$f'_b < 0 \iff u(b, x) = \frac{(1+xb) \log(1+xb)}{x(1+b) \log(1+b)} < 1.$$

Рассмотрим $(\frac{(1+xb) \log(1+xb)}{x})'_x = \frac{xb - \log(1+xb)}{x^2}$. Сделаем замену $xb = t$, причем $t - \log(1+t) > 0$ при $t > 0$. Следовательно,

$$u(b, x) = \frac{(1+xb) \log(1+xb)}{x(1+b)(\log(1+b))} \text{ строго возрастает по } x \text{ при } x > 0. \quad (8)$$

Подставим в (8) значение $x = 1$:

$$u(b, 1) = \frac{(1+b) \log(1+b)}{(1+b) \log(1+b)} = 1 \implies u < 1 \text{ при } 0 < x < 1 \implies f'_b < 0.$$

Получаем, что f строго убывает по b при $b > 0$, исходная функция L также строго убывает по b . Подставим теперь в функцию L значение $b = a$:

$$L(a, a, x) = \frac{\log(1+xa) \log(1+a)}{\log(1+a) \log(1+xa)} = 1 \implies L(a, b, x) = \frac{\log(1+xa) \log(1+b)}{\log(1+a) \log(1+xb)} < 1 \text{ при } b > a. \quad \square$$

Таким образом, $Z < 0$, что означает, что с увеличением размера потока Интернета вещей увеличивается выигрыш от NOMA по общему времени передачи. Рассмотрим теперь полное приращение ΔT :

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{i}{F} \cdot \left(\frac{\log(1+b) \log(1+xa) - \log(1+a) \log(1+xb)}{\log(1+a) \log(1+b) \log(\frac{1+a}{1+xa})} \right) = \\ &= \frac{i}{F} \cdot \left(\frac{Z(a, b, x)}{\log(1+a) \log(1+b) \log(\frac{1+a}{1+xa})} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Рассмотрим функцию $U(a, b, x) = \frac{Z(a, b, x)}{\log(1+b)}$.

$$U'_b = \frac{\log(1+a)((1+xb) \log(1+xb) - x(1+b) \log(1+b))}{(1+b)(1+xb) \log^2(1+b)}. \quad (10)$$

Числитель выражения (10) меньше нуля, как следует из доказательства Теоремы 1. Следовательно $U'_b < 0$, что означает, что $U(a, b, x)$ строго убывает по b , и поэтому ΔT также строго убывает по b при $0 < a < b, 0 < x < 1$. Таким образом, чем лучше каналные условия устройства, принимающего веб-поток, который берется в пару к потоку Интернета вещей, тем больше выигрыш от совместной передачи по общей длительности.

4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Случай двух потоков

Построим графики зависимости значения ΔT из выражения (9) от размера потока Интернета вещей. Пусть $b = ka$, где $k > 1$ (так как $b > a$), $F = 20$ МГц. Базовое отношение сигнал/шум потока Интернета вещей, выраженное в дБ, рассчитывается так:

$$a_{dB} = P_{max} - Pathloss(d_a) - Noise.$$

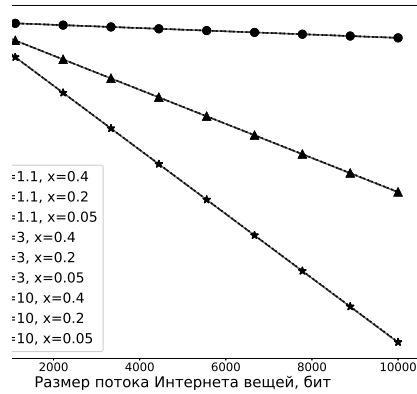


Рис. 3. Передача потока Интернета вещей на расстояние 5 м

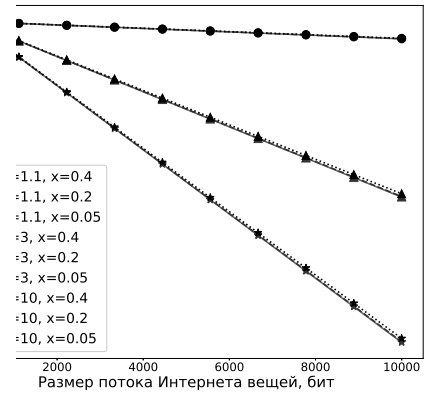


Рис. 4. Передача потока Интернета вещей на расстояние 10 м

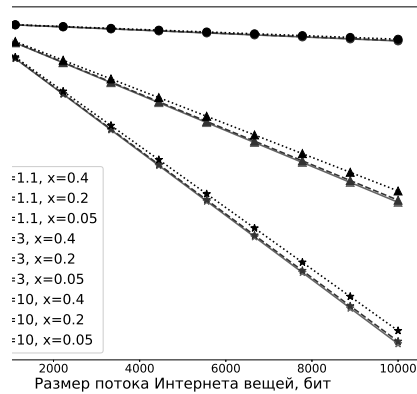


Рис. 5. Передача потока Интернета вещей на расстояние 15 м

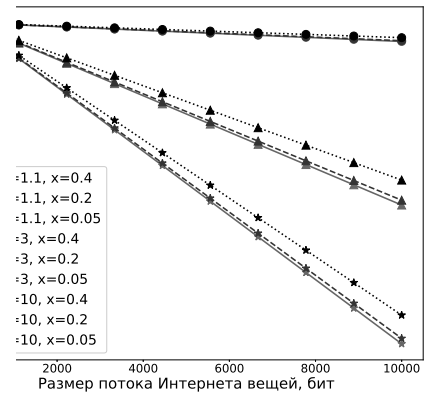


Рис. 6. Передача потока Интернета вещей на расстояние 20 м

Здесь P_{max} – максимальная мощность передачи, $Pathloss(d_a)$ – потери мощности при распространении сигнала на расстоянии d_a от точки доступа, $Noise$ – мощность шума. Пусть $P_{max} = 15$ дБм, $Noise = -86$ дБм, а потери мощности вычисляются следующим образом [9]:

$$Pathloss(d) = 40.05 + 20 \log_{10}(\min(d, 5.0)) + 20 \log_{10}(5/2.4) + \mathbb{I}(d > 5) \cdot 35 \log_{10}(d/5).$$

Значения ΔT для передачи потока Интернета вещей на расстояние 5, 10, 15 или 20 метров от точки доступа, показаны на рис. 3–6. Видно, что если каналные условия устройств, принимающих поток Интернета вещей и веб-поток, похожи ($k = 1.1$), то использование NOMA почти не уменьшает длительность передачи. При этом с улучшением каналных условий для веб-потока выигрыш по суммарной длительности передачи при использовании NOMA растет быстрее.

Также по графикам можно сделать вывод, что чем дальше находится поток Интернета вещей от точки доступа, тем сильнее влияет на производительность коэффициент разделения мощности x : более плохие каналные условия устройства Интернета вещей означают большую длительность совместной передачи. Рассмотрим часть выражения (9), которая относится к совместной передаче:

$$\frac{i}{r(IoT|Web)} - \frac{i \cdot r(Web|IoT)}{r(Web)r(IoT|Web)} = \frac{i}{r(IoT|Web)} \left(1 - \frac{r(Web|IoT)}{r(Web)} \right). \quad (11)$$

Видно, что с увеличением $r(IoT|Web)$ и, как следствие, уменьшением $r(Web|IoT)$ значение данного выражения увеличивается. При уменьшении $r(IoT|Web)$ значение выражения (11) уменьшается. Поэтому увеличение коэффициента x ведет к уменьшению общей длительности передачи. В системе с большим количеством потоков, в которой постоянно приходят новые потоки, увеличивать коэффициент x может оказаться невыгодно: другие потоки будут дольше ждать окончания совместной передачи, в связи с чем общая производительность системы упадет. Далее рассмотрены результаты имитационного моделирования такой системы.

4.2. Общий случай

Проведено исследование использования NOMA в системе с веб-потоками и потоками Интернета вещей с помощью имитационной модели в следующем сценарии. Точка доступа работает в канале 20 МГц в диапазоне 5 ГГц. Веб-потоки постоянно прибывают на точку доступа по экспоненциальному закону параметром $(0, 7)^{-1}$, потоки Интернета вещей прибывают с фиксированной частотой. Каждый поток должен быть доставлен своему пользователю, причем пользователи равномерно распределены в круге с центром в точке доступа радиуса 30 метров. Размер веб-потока распределен в соответствии с усеченным логнормальным распределением с минимальным, средним и максимальным значениями 100 КБ, 3 МБ и 100 МБ соответственно. Размеры потоков Интернета вещей фиксированы. Максимальная мощность передачи $P_{max} = 15$ дБм. Все потоки могут быть переданы с помощью NOMA или OMA.

Реализован планировщик, решающий задачу (4) и использующий функцию полезности PF. Проведена серия экспериментов, в которой сравнивались следующие подходы:

1. OMA: NOMA не применяется.
2. NOMA-Web: применение NOMA допускается только для совместных передач двух веб-потоков.
3. NOMA: допускается применение NOMA как для совместных передач двух веб-потоков, так и для совместных передач веб-потока и потока Интернета вещей.
4. NOMA-IoT-min: возможно применение NOMA для совместных передач двух веб-потоков и для совместных передач веб-потока и потока Интернета вещей, причем если для передачи с помощью NOMA был выбран поток Интернета вещей, то для его передачи используется минимальная СКК. Данный подход означает максимизацию коэффициента разделения мощности x .

На рис. 7 и 8 представлены графики зависимости средней длительности загрузки веб-потоков и общей пропускной способности от частоты прихода потоков Интернета вещей для

указанных четырех подходов. По данным результатам можно сделать вывод, что применение NOMA для потоков Интернета вещей размером 100 байт не оказывает значительного влияния на производительность системы. Для потоков Интернета вещей размером 1 КБ подход с использованием минимальной СКК для передачи потока Интернета вещей может ощутимо повысить длительность загрузки веб-потоков. Данное ухудшение связано с тем, что в системе может быть много других потоков, которые ждут окончания совместных передач с потоками Интернета вещей, что повышает их время нахождения в системе. В то же время использование NOMA без ограничения на используемую СКК показывает небольшой прирост в производительности. По графикам также можно сделать вывод, что использование NOMA для совместной передачи веб-потоков значительно повышает производительность всей системы.

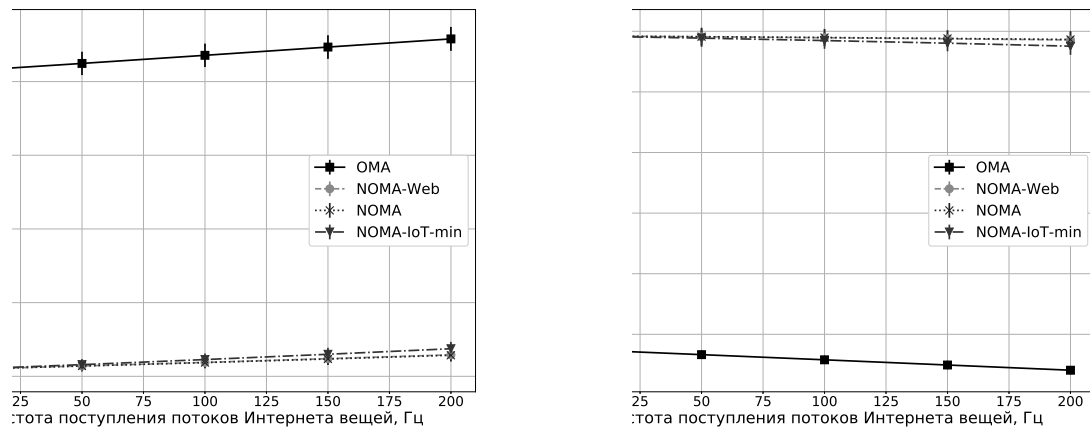


Рис. 7. Размер потока Интернета вещей = 100 Б

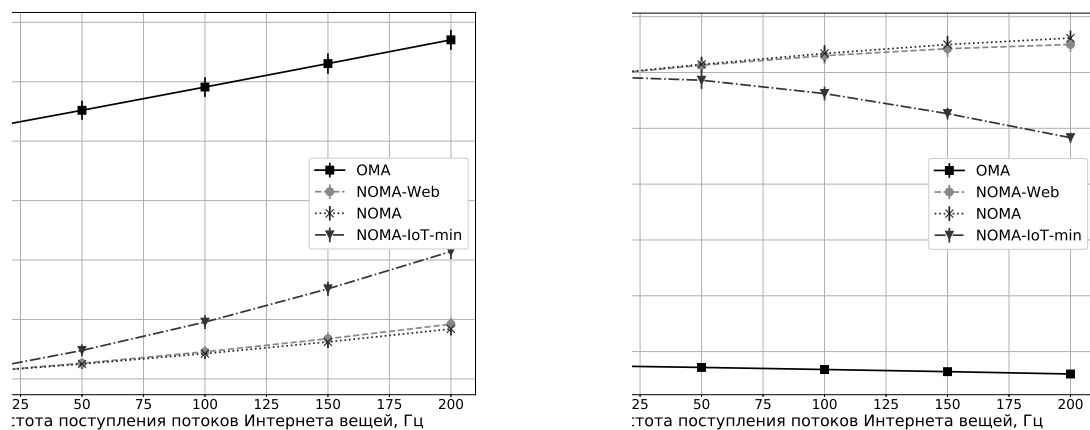


Рис. 8. Размер потока Интернета вещей = 1 КБ

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена сеть передачи данных, которая использует NOMA. Исследованы возможности применения NOMA для совместной передачи веб-потока и потока Интернета вещей. Показано, что использование NOMA для таких передач потенциально может понижать общую длительность передачи потоков и, как следствие, повышать пропускную спо-

способность. По результатам имитационного моделирования можно сделать вывод, что использование NOMA для совместных передач потока Интернета вещей и веб-потока незначительно повышает производительность системы, причем только при относительно больших размерах потоков Интернета вещей и при их высокой частоте поступления. При этом применение NOMA для передачи веб-потоков показало заметное увеличение пропускной способности и уменьшение средней длительности передачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khorov Evgeny, Kureev Aleksey, Levitsky Ilya. NOMA Testbed on Wi-Fi // 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) / IEEE. — 2018. — P. 1153–1154.
2. On multiple users scheduling using superposition coding over Rayleigh fading channels / Ammar Zafar, Mohammad Shaqfeh, Mohamed-Slim Alouini, Hussein Alnuweiri // IEEE Communications Letters. — 2013. — Vol. 17, no. 4. — P. 733–736.
3. Otao Nagisa, Kishiyama Yoshihisa, Higuchi Kenichi. 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. — P. 476–480.
4. Multi-user proportional fair scheduling for uplink non-orthogonal multiple access (NOMA) / Xiaohang Chen, Anass Benjebbour, Anxin Li, Atsushi Harada // 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring) / IEEE. — 2014. — P. 1–5.
5. Liu Fei, Mähönen Petri, Petrova Marina. Proportional fairness-based user pairing and power allocation for non-orthogonal multiple access // 2015 IEEE 26th annual international symposium on personal, indoor, and mobile radio communications (PIMRC) / IEEE. — 2015. — P. 1127–1131.
6. On the optimality of power allocation for NOMA downlinks with individual QoS constraints / Zhao-hui Yang, Wei Xu, Cunhua Pan et al. // IEEE Communications Letters. — 2017. — Vol. 21, no. 7. — P. 1649–1652.
7. Optimal joint power and subcarrier allocation for MC-NOMA systems / Yan Sun, Derrick Wing Kwan Ng, Zhiguo Ding, Robert Schober // 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) / IEEE. — 2016. — P. 1–6.
8. Weighted Proportional Fair scheduling for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access / Marie-Rita Hojeij, Charbel Abdel Nour, Joumana Farah, Catherine Douillard // Wireless Communications and Mobile Computing. — 2018.
9. Committee TGac Channel Models Special et al. TGac channel model addendum // IEEE 802.11-09/0308r0. — 2009.

Non-orthogonal multiple access for servicing Internet of Things and Web traffic in Wi-Fi networks¹

E.M. Khorov, S.A. Tutelian

Nowadays, many devices require a wireless Internet connection, while the available frequency spectrum is limited. Non-orthogonal multiple access (NOMA) is a multiplexing technology that can significantly improve spectral efficiency and thus solve this problem. This paper investigates the use of NOMA in Wi-Fi networks with two traffic types: Web and Internet of Things (IoT) traffic. Web traffic is one of the main Internet traffic types. It consists of relatively small data flows that need to be quickly delivered to users. IoT traffic consists of very short data flows compared to Web, but there can be a lot of IoT flows due to the large number of IoT devices. In this paper, we propose an algorithm for resource allocation in Wi-Fi networks with NOMA. This algorithm takes into account traffic of both types, and we investigate its performance by simulation.

KEYWORDS: Wireless network, Wi-Fi, NOMA, Internet of Things.

¹ The research has been carried out at IITP RAS and supported by the grant No 18-37-20077 mol-a-ved of the Russian Foundation for Basic Research