ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ ———

# Совместное использование методов OFDMA и NOMA в восходящем канале в сетях Wi-Fi<sup>1</sup>

## С.А. Тутельян\*, Е.М. Хоров\*

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия Поступила в редколлегию 01.09.2022. Принята 05.12.2022 г.

Аннотация—Количество беспроводных устройств, а также объемы их трафика постоянно растут, что приводит к ухудшению качества обслуживания. Для борьбы с этой проблемой новый стандарт Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ах) вводит механизм OFDMA (англ.: Orthogonal Frequency Division Multiple Access), с помощью которого можно осуществлять координированные многопользовательские передачи с разделением по частоте. Для будущих сетей Wi-Fi предложен также другой механизм мультиплексирования пользователей: неортогональный множественный доступ (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), который позволяет передавать нескольким пользователям на одних и тех же частотах одновременно и разделять разные сигналов по уровню мощности. В данной работе рассматривается совместное применение указанных механизмов в восходящем канале в сетях Wi-Fi 6 и ставится задача оптимального распределения радиоресурсов между пользователями в смысле максимизации некоторой функции полезности, например, среднего геометрического пропускной способности. Для ее решения в работе предложен алгоритм, учитывающий частотную селективность канала и использующий OFMDA и NOMA одновременно. Показано, что совместное использование OFDMA и NOMA позволяет значительно повысить пропускную способность сети и снизить задержки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** неортогональный множественный доступ, планирование радиоресурсов, Wi-Fi.

**DOI:** 10.53921/18195822 2022 22 4 347

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день происходит бурный рост числа устройств, которым требуется доступ в Интернет. Растут и требования к качеству предоставляемого беспроводного доступа. Однако частотные ресурсы ограничены, в результате чего возникает задача эффективного использования доступных ресурсов. С выходом нового стандарта Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax [1]) актуальность задачи управления передачами значительно повысилась, так как данный стандарт вводит различные механизмы, координированного распределения канальных ресурсов.

Одним из механизмов является метод многопользовательских передач с ортогональным разделением по частоте (англ.: Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA). Весь доступный канал делится по частоте на ресурсные блоки (англ.: Resource Unit, RU), которые выделяются пользователям, причем каждому пользователю может быть выделен только один ресурсный блок. OFDMA позволяет учитывать особенности частотно-селективных каналов, где различные ресурсные блоки характеризуются разным затуханием. Например, передачи для каждой станции могут вестись только в таких участках полосы, в которых они имеют наилучшее качество канала. Кроме этого, для передач в восходящем канале при сужении

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00846

полосы повышается плотность мощности на данном участке, поэтому при использовании многопользовательских передач суммарная мощность также повышается.

Другим механизмом, недавно предложенным для будущих сетей Wi-Fi [2,3], является неортогональный множественный доступ (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), который позволяет в одной и той же частотной полосе передавать сразу несколько сигналов одновременно. В частности, в данной работе рассматривается вариант разделения сигналов по различным уровням мощности. Известно, что он эффективен при мультиплексировании станций с отличающимся затуханием в канале. Метод NOMA, в отличие от OFDMA, не предусматривается стандартом 802.11ах, однако известны несколько его реализаций, обратно-совместимые со стандартом [3–5].

Для организации многопользовательских передач в восходящем канале, стандарт 802.11ах вводит механизм планирования передач. Точка доступа выбирает станции и распределяет между ними канальные ресурсы, после чего отправляет данную информацию в специальных служебных кадрах, называемых триггер-кадрами. После получения такого кадра станции передают данные в назначенных им ресурсных блоках. Этот метод позволяет значительно снизить интерференцию между станциями: им не нужно бороться за доступ к каналу между собой. При этом задача распределения канальных ресурсов ложится на точку доступа. Подробнее этот механизм описывается в разделе 2. Отметим, что при назначении одного и того же ресурсного блока группе станций в триггер-кадре можно организовать передачи с помощью NOMA в восходящем канале.

Еще одним методом многопользовательского доступа, введенным стандартом 802.11ах для передач в восходящем канале, является метод многопользовательских многоантенных передач (англ.: Multi-User Multiple Input Multiple Output, MU-MIMO)<sup>2</sup>. Данный механизм имеет сравнительно высокую сложность имплементации в оборудовании, так как необходимы более сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов по оценке, разделению и синхронизации получаемых сигналов [6,7]. Кроме того, производительность MU-MIMO сильно зависит от точности и актуальности информации о значениях канальных коэффициентов для всех антенн пользователей и точки доступа. При этом сами передачи такой информации могут занимать большое количество канальных ресурсов сети, что сильно влияет на итоговую производительность сети [8].

В то же время OFDMA и NOMA могут быть использованы даже если устройства являются одноантенными, и для их использования достаточно только значений затухания. Учитывая указанные сложности, в данной работе в качестве способов многопользовательских передач рассматриваются только NOMA и OFDMA.

Описанные выше механизмы позволяют обеспечить эффективную работу сети с точки зрения, например, пропускной способности, для чего требуются алгоритмы управления ими. В связи с этим в данной работе рассматривается задача разработки алгоритма планирования ресурсов для передач в восходящем канале, при использовании NOMA и/или OFDMA.

Совместное использование NOMA и OFDMA уже исследовалось, например, в сотовых сетях [9–11], без учета особенностей сетей Wi-Fi. В частности, в работе [9] были предложены методы группировки пользователей на основе данных об их канальных условиях, а также предложен алгоритм распределения мощности внутри построенных групп. Показано, что использование NOMA увеличивает суммарную пропускную способность в нисходящем и в восходящем направлениях. Однако разделение пользователей по частоте не рассматривалось.

Подобная задача рассматривалась в сотовых сетях, где существует ограничение на выделение частотных ресурсов при работе в восходящем канале: каждый пользователь должен

 $<sup>^2</sup>$ В нисходящем канале этот метод был доступен, начиная с IEEE 802.11<br/>ac.

использовать для передачи непрерывный набор частот. В частности, в работе [10] исследовалось использование NOMA и OFDMA при учете указанного ограничения. Было предложено разбивать пользователей на группы, исходя из их разницы в канальных условиях для эффективного применения NOMA. При этом разбиение по частоте осуществляется с помощью последовательного расширения выделенной для каждого пользователя полосы. В результате показано, что использование NOMA позволяет заметно увеличить пропускную способность сети.

Также существуют исследования, посвященные распределению радиоресурсов в сетях Wi-Fi при применении OFDMA. В работе [12] рассмотрено несколько простых методов назначения ресурсных блоков пользователям в восходящем канале. Показано значительное превосходство сети 802.11ах над сетью 802.11ас с точки зрения достигаемой пропускной способности. Однако рассматриваемая в работе модель сети является довольно простой: канальные условия пользователей не отличаются друг от друга.

Более сложная модель сети 802.11ax рассмотрена в работе [13]. В ней предложен алгоритм распределения доступных ресурсов по пользователям для плоского канала, то есть не являющегося частотно-селективным. Показано, что OFDMA позволяет достичь более высоких значений пропускной способности по сравнению с использованием однопользовательских передач.

В работе [14] рассмотрена эта же задача, но в условиях частотно-селективного канала и межсетевой интерференции. Предложенный алгоритм, учитывающий неоднородности в каналах пользователей, показал значительное превосходство над алгоритмом, который использует только однопользовательские передачи. Настоящая статья дополняет эту статью тем, что станции теперь имеют возможность использовать NOMA.

В работе [15] рассмотрен рекурсивный подход в выделении ресурсных блоков пользователям. Задача решается для большого ресурсного блока и затем отдельно для всех ресурсных блоков меньшего размера, из которых состоит большой ресурсный блок. Описываемый алгоритм учитывает частотную селективность, однако он рассматривается для передач в нисходящем канале, в связи с чем он не учитывает специфики управления мощностью и назначения сигнально-кодовых конструкций (СКК) пользователям: считается, что станции передают на наилучшей СКК.

Существует ряд работ [3,4,16–19], в которых рассматривается задача применения NOMA в сетях Wi-Fi. В этих работах акцентируется внимание на непосредственных методах реализации технологии NOMA в Wi-Fi, включающих способы формирования и приема сигналов, а также особые протоколы передач. В частности, в работе [3] показано, что интерференция от слабого кадра при приеме сильного при использовании NOMA может накладывать более мягкие ограничения при приеме на требуемые значения отношения сигнал/шум, чем, гауссовский шум. В отличие от указанных работ, данная работа исследует увеличение производительности сети в целом за счет распределения канальных ресурсов при одновременном использовании NOMA и OFDMA. Ставится задача выбора станций на передачу, и определения для этих станций длительности передачи, мощностей, используемых сигнально-кодовых конструкций (CKK), ресурсных блоков с целью повышения среднего геометрического пропускной способности (или иной функции полезности). В работе предложен алгоритм, решающий эту задачу и проведено сравнение его эффективности по сравнению с алгоритмами, использующими только один метод доступа: либо NOMA, либо OFDMA.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 представлена схема многопользовательских передач при использовании OFDMA и NOMA. В разделе 3 описывается используемая модель сети Wi-Fi. Раздел 4 описывает постановку задачи, а также предложенный алгоритм распределения ресурсов. В разделе 5 представлены результаты имитационного моделирования. Раздел 6 завершает работу.

## 2. СХЕМА ПЕРЕДАЧ

#### 2.1. OFDMA

Согласно стандарту 802.11ах весь доступный канал делится по частоте на ресурсные блоки r различной ширины. Выделяют ресурсные блоки с 26, 52, 106, 242, 484 и 996 поднесущими (англ.: tone). При этом конкретный набор ресурсных блоков имеет иерархическую структуру и зависит от общей ширины канала. Например, каналу шириной 40 МГц соответствует ресурсный блок с 484 поднесущими, который можно разделить на два ресурсных блока с 242 поднесущими, каждый из которых в свою очередь можно делить на ресурсные блоки меньшего размера. Два различных ресурсных блока  $r_i$  и  $r_j$  либо не пересекаются ( $r_i \cap r_j = \emptyset$ ), либо один полностью содержится в другом ( $r_i \cup r_j = r_i$ , если  $r_i$  шире  $r_j$ , в противном случае  $r_j \cup r_i = r_j$ ).

Пусть станция *s* передает в некоторой полосе с мощностью *P*, а затухание в канале равно *h*. Тогда отношение сигнал/шум (англ.: Signal to Noise Ratio, SNR) на получателе в данной полосе будет равно:

$$SNR(s) = \frac{P|h|^2}{\sigma^2},\tag{1}$$

где  $\sigma^2$  — мощность шума в рассматриваемой полосе.

При назначении ресурсных блоков для выполнения передачи каждой станции может быть выделено не более одного ресурсного блока. Также существует другое ограничение на выделение ресурсов, которое связано с тем, что получаемая мощность от разных станций не может сильно отличаться. Несмотря на то, что станции передают на разных частотах, более сильные сигналы могут накладываться на более слабые из-за утечек энергии в соседние подканалы, в результате чего слабые сигналы могут быть приняты с ошибкой [20]. Чтобы избежать таких помех, точке доступа следует так назначать мощности сигналов, чтобы получаемый уровень мощности всех приходящих сигналов был приблизительно одинаковым. Данное ограничение рассматривается более подробно в разделе 4.1.

Стандарт 802.11ах вводит триггер-кадры, в которых передается информация о наборе клиентских станций, которые должны будут передавать, и о выделяемых им ресурсах. Для каждой такой станции указывается ресурсный блок, СКК и требуемый уровень мощности при приеме на самой точке доступа. Получив информацию о требуемой мощности, станция оценивает затухание в канале по полученному триггер-кадру и вычисляет необходимую мощность передачи.

Также эти триггер-кадры служат для синхронизации по времени между станциями, чтобы передачи в восходящем канале начинались одновременно. Кроме того, в триггер-кадре передается еще и длительность передачи, чтобы станции оканчивали свои передачи одновременно. Если какая-то станция не может наполнить всю указанную длительность полезными данными, то станция дополняет свою передачу неинформационными битами.

Схема передачи показана на рис. 1. Точка доступа отправляет триггер-кадр, после которого спустя короткий межкадровый интервал (англ.: Short Interframe Space, SIFS) станции начинают передавать свои данные в указанных ресурсных блоках. Затем еще через SIFS точка доступа отправляет специальный кадр подтверждения, обозначенный на рис. 1 как Multi-ACK. В этом кадре указывается информация об успешно принятых кадрах сразу для всех станций.



Рис. 1. Передачи в восходящем канале с использованием триггер-кадров

#### 2.2. NOMA

В данной работе предполагается, что NOMA может быть использована для мультиплексирования только двух сигналов, так как поддержка трех и более сигналов может значительно усложнить аппаратное обеспечение, а ожидаемое увеличение производительности получается сравнительно небольшим [21, 22]. Рассмотрим процесс передачи с помощью NOMA.

При использовании NOMA точка доступа принимает два сигнала сразу: сильный и слабый. Точка доступа сначала декодирует сильный сигнал, рассматривая слабый сигнал как шум. Затем из общего принятого сигнала вычитает декодированный сигнал, после чего точка доступа может декодировать слабый сигнал без влияния сильного сигнала.

Пусть станции  $s_1$  и  $s_2$  передают свои сигналы в некоторой полосе частот,  $h_1$  и  $h_2$  — их канальные коэффициенты (затухание в канале), P — максимальная мощность передачи одной станции. Пусть также  $s_1$  передает слабый сигнал. Тогда отношения сигнал/шум на точке доступа для станций  $s_1$  и  $s_2$  при условии идеального вычитания сигналов будут следующими:

$$SNR^{weak}(s_1) = \frac{xP|h_1|^2}{\sigma^2},\tag{2}$$

$$SNR^{strong}(s_2) = \frac{P|h_2|^2}{xP|h_1|^2 + \sigma^2},$$
(3)

где  $x \in [0,1]$  — коэффициент уменьшения мощности для слабого сигнала, который нужен для повышения значения SNR сильного сигнала. Стоит отметить, что выбор того, какой из пользователей посылает сильный сигнал, а какой слабый и с каким коэффициентом мощности x, осуществляется точкой доступа с помощью разрабатываемого в статье алгоритма.

## 3. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

В работе рассматривается сеть Wi-Fi с одной или несколькими точками доступа, вокруг которых равномерно распределены клиентские станции в круге радиусом D с центром в точке доступа. На каждую станцию в случайные моменты времени, выбранные из заданного распределения, приходят потоки данных конечной длины, причем новые потоки не появляются на станции до тех пор, пока станция не передаст текущий. Все передачи в восходящем канале происходят с использованием триггер-кадров.

Пусть станция передает в ресурсном блоке r. В условиях частотной селективности затухание в канале отличается для разных поднесущих, в связи с чем отличаются и отношения сигнал/шум на приемнике. Пусть  $SNR_i$  — значения SNR, подсчитанные по формулам (1), (2)

#	CKK	Мин. сигнал/шум, дБ
0	BPSK, $1/2$	4
1	QPSK, $1/2$	7
2	QPSK, $3/4$	9
3	16-QAM, 1/2	12
4	16-QAM, 3/4	16
5	64-QAM, 2/3	20
6	64-QAM, 3/4	21
7	64-QAM, 5/6	22
8	256-QAM, 3/4	27
9	256-QAM, 5/6	29
10	1024-QAM, $5/6$	32
11	1024-QAM, 5/6	34

Таблица 1. Минимальные требования на отношения сигнал/шум принимаемого сигнала

и (3) для каждой поднесущей  $i \in r$ . Тогда отношением сигнал/шум на всем ресурсном блоке, называемое также эффективным SNR, будем считать оценку среднего значения SNR по оценкам канальной емкости [23]:

$$SNR_{eff}(s) = 2^{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\log_2\left[1+SNR_i(s)\right]} - 1 = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n}\left[1+SNR_i(s)\right]} - 1.$$
(4)

Передача на СКК  $l \in L$ , где L — множество всех СКК, считается успешной, если получающееся отношение сигнал/шум на заданном ресурсном блоке выше некоторого порогового уровня для l. В данной работе используются пороговые уровни, которые были рассчитаны исходя из требований к чувствительности приемника из стандарта 802.11ах. Они указаны в таблице 1. Стоит отметить, что использование СКК 10 и 11 возможно только в ресурсных блоках шириной не меньше 242 поднесущих.

## 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ

#### 4.1. Постановка задачи

Как уже было отмечено, все передачи в восходящем направлении происходят с помощью триггер-кадров. Перед отправкой триггер-кадра точка доступа должна определить множество станций, которые будут передавать, а также ресурсный блок, СКК и мощность передачи для каждой из выбранных станций. Для решения этой задачи задается функция полезности  $\lambda(s, r, l)$ , показывающая качество назначений, где  $s \in S$  — станция, S — множество всех станций, r — выбранный ресурсный блок,  $l \in L$  — СКК, определяемая своей номинальной скоростью. При этом  $\lambda(s, r, l) = 0$ , если успешная передача станцией s в ресурсном блоке r на СКК l невозможна при заданных ограничениях на передаваемую мощность, согласно таблице 1.

Пусть G — множество троек (s, r, l), описывающее распределение станций по ресурсным блокам, а также назначение СКК для каждой станции. Тогда значение функции F(G) описывает полезность распределения ресурсов:

$$F(G) = \sum_{(s,r,l)\in G} \lambda(s,r,l).$$
(5)

Пусть  $\mathfrak{G}$  — множество всех значений G, подчиняющихся следующим правилам:

1. Каждой станции может быть назначен только 1 ресурсный блок и только 1 СКК. Иными словами,  $\forall (s_1, r_1, l_1), (s_2, r_2, l_2) \in G \Rightarrow s_1 \neq s_2.$ 

- 2. Каждый ресурсный блок может быть выделен не более чем двум станциям (при выделении одного ресурсного блока двум станциям используется NOMA):  $\forall r^* \Rightarrow card(\{(s, r, l) \in G : r = r^*\}) \leq 2$ , где card(G) число элементов в G.
- 3. Ресурсные блоки из G не пересекаются между собой:  $\forall (s_1, r_1, l_1), (s_2, r_2, l_2) \in G : r_1 \neq r_2 \Rightarrow r_1 \cap s_2 = \emptyset.$
- 4. В получившемся распределении ресурсов можно так назначить мощности станциям, что не будет потерь, вызванных наложением сигналов из-за неидеальности радиомодулей.

Последнее правило при использовании только OFDMA можно записать в следующем виде:

$$\frac{\max_{(s,r,l)\in G} P_{rx}(s,r)}{\min_{(s,r,l)\in G} P_{rx}(s,r)} \le P_{limit},\tag{6}$$

где  $P_{rx}(s,r)$  — суммарная мощность на получателе сигнала от станции s,  $P_{limit}$  — максимально допустимая разница мощностей, при превышении которой слабый сигнал теряется. Стоит отметить, что при использовании только OFDMA это условие можно всегда выполнить, если отсутствует ограничение на минимальную передаваемую мощность со станции. Для этого необходимо выбрать станцию из G с самым большим затуханием в канале, назначить ей максимальную мощность передачи, а остальным станциям соответствующим образом снизить мощность от максимальной, если условие (6) не выполняется.

При использовании NOMA указанное ограничение приобретает следующий вид:

$$\frac{\max_{r\in G}\sum_{s} P_{rx}(s,r)}{\min_{(s,r,l)\in G, r\neq r_{max}} P_{rx}(s,r)} \le P_{limit},\tag{7}$$

где  $\sum_{s} P_{rx}(s,r)$  означает суммарную принимаемую мощность от пользователей в данном ресурсном блоке,  $r_{max}$  — ресурсный блок, в котором получается максимальная принимаемая мощность.

В итоге задача нахождения лучшего назначения ресурсов может быть записана следующим образом:

$$\max_{G \in \mathfrak{G}} F(G) = \max_{G \in \mathfrak{G}} \sum_{(s,r,l) \in G} \lambda(s,r,l).$$

В данной работе в качестве примера функции полезности назначения выбрано отношение

$$\lambda(s,r,l) = \frac{rate(s,r,l)}{Q(s)},$$

где rate(s, r, l) — скорость передачи данных на СКК l в ресурсном блоке r, Q(s) — средняя скорость передачи станции s. Скорость равна нулю, если не удовлетворены условия на SNR из таблицы 1. Данная функция полезности соответствует пропорционально справедливому распределению радиоресурсов (англ.: Proportional Fair, PF).

## 4.2. Алгоритм распределения ресурсов

Построенный в данной работе алгоритм основан на алгоритме из работы [14]. Рассмотрим его подробнее. На первом шаге перебираются СКК, которые будут использоваться во всех ресурсных блоках, так как из-за требования (6) необходимо приблизительно одинаковое отношение сигнал/шум на приемнике для всех станций, и, следовательно, можно назначить единую СКК. Затем для заданной СКК всем станциям назначается приоритет, который определяется по максимальному значению  $\lambda(s, r, l)$  среди доступных ресурсных блоков размером

242 поднесущих. После этого каждой станции поочередно, начиная со станции с наибольшим приоритетом, выделяется наибольший ресурсный блок (в том числе, шире или уже 242 поднесущих), в котором она может совершить успешную передачу, исходя из значений из таблицы 1. Так получаются распределения ресурсных блоков для всех доступных СКК, после чего из них выбирается наилучшее с точки зрения значения суммарной метрики (5).

Описанный алгоритм использует жадный подход, который обладает низкой вычислительной сложностью. Это важно для устройств Wi-Fi, которые должны быть сравнительно простыми и недорогими. В связи с этим алгоритм, который учитывает использование NOMA, также должен обладать низкой вычислительной сложностью. В данной работе для этого предлагается модифицировать описанный выше алгоритм так, чтобы он добавлял еще по одному пользователю в уже назначенные ресурсные блоки, если при этом увеличивается рассматриваемая суммарная функция полезности (5).

Пусть при фиксированной СКК  $l_f$  описанным выше алгоритмом получено назначение ресурсных блоков по станциям  $G_{ofdma}$ , а также назначены мощности так, чтобы было удовлетворено условие (6). Пусть еще остались свободные станции, то есть такие, которым не были выделены ресурсы. Эти станции сортируются согласно значениям некоторой метрики  $\phi$ , характеризующей качество применения NOMA:

$$\phi(s^{free}) = \frac{1}{card(G_{ofdma})} \sum_{(s,r,l_f)\in G_{ofdma}} \max\left(\frac{P_{rx}(s^{free},r)}{P_{rx}(s,r)}, \frac{P_{rx}(s,r)}{P_{rx}(s^{free},r)}\right),\tag{8}$$

где  $s^{free}$  — станция, которой еще не назначили ресурсный блок;  $card(G_{ofdma})$  — число элементов в  $G_{ofdma}$ , то есть количество станций, которым уже выделены ресурсы. Значения  $\phi(s^{free})$  показывают усредненную величину разницы в уровнях принимаемых сигналов, что позволяет судить о том, насколько данная станция подходит для передачи с помощью NOMA, так как NOMA получает выигрыш от большей разницы в уровнях мощности.

Пусть свободные станции отсортированы по убыванию значений  $\phi(s^{free})$ . Назовем ресурсные блоки, занятые только одной станцией, свободными для NOMA. Для каждой свободной станции, начиная с первой, выбирается свободный для NOMA ресурсный блок, а также назначаются СКК и мощности передачи так, чтобы прирост функции (5) был наибольшим:

$$\max_{G_{new}} \Delta F = \max_{G_{new}} \left( F(G_{new}) - F(G_{old}) \right) = \\ \max_{(s,r,l)\in G_{old}} \left( \max_{(l_1,l_2)\in L_{avail}(s,s^{free},r)} \left( \lambda(s,r,l_1) + \lambda(s^{free},r,l_2) - \lambda(s,r,l_f) \right) \right), \tag{9}$$

где  $L_{avail}(s, s^{free}, r)$  — такое множество пар СКК, которое позволяет точке доступа принять оба кадра успешно при помощи NOMA для данной пары станций и ресурсного блока;  $G_{new}$  — новое распределение ресурсов, полученное из старого  $G_{old}$  путем добавления одной свободной станции в свободный для NOMA ресурсный блок. Процесс выбора СКК и мощностей для передач с использованием NOMA описывается в разделе 4.3.

Если закончились свободные для NOMA ресурсные блоки или свободные станции, а также если при попытке включить в передачу следующую по очереди свободную станцию прирост функции  $\Delta F$  (9) всегда неположительный, то процесс выделения ресурсов новым станциям заканчивается для заданной СКК  $l_f$ . Результатом алгоритма является лучшее распределение ресурсов по всем СКК, согласно функции F.

При каждом выборе свободной станции алгоритм перебирает все возможные свободные для NOMA ресурсные блоки. Эта часть алгоритма может быть упрощена, то есть можно осуществлять выбор свободного для NOMA ресурсного блока при образовании пары NOMA

со свободной станцией без перебора. В связи с тем, что передачи с помощью NOMA получают прирост в пропускной способности от большей разницы в канальных условиях между станциями, предлагается выбирать такой свободный ресурсный блок, для которого имеется наибольшая разность в приходящей мощности между распределенной в него станцией и свободной станцией. В этом случае для каждой свободной станции необходимо вычисление *F* с перебором только по парам СКК.

## 4.3. Управление NOMA

Пусть для передачи с использованием NOMA выбраны станции  $s_1$  и  $s_2$  в ресурсном блоке r, P — мощность передачи, n — количество поднесущих в r. Рассмотрим отношения сигнал/шум для сильного и слабого сигналов:

$$\begin{split} SNR_i^{weak} &= \frac{x\frac{P}{n}|h_i^{weak}|^2}{\sigma^2} = xa_i,\\ SNR_i^{strong} &= \frac{\frac{P}{n}|h_i^{strong}|^2}{x\frac{P}{n}|h_i^{weak}|^2 + \sigma^2} = \frac{b_i}{xa_i + 1},\\ a_i &= \frac{\frac{P}{n}|h_i^{weak}|^2}{\sigma^2},\\ b_i &= \frac{\frac{P}{n}|h_i^{strong}|^2}{\sigma^2}, \end{split}$$

где  $h_i^{weak}, h_i^{strong}$  — канальные коэффициенты станций, передающих слабый и сильный сигналы соответственно, на поднесущей  $i \in r, \sigma^2$  — средняя мощность теплового шума на каждой поднесущей. При использовании формулы (4) данные значения можно переписать так:

$$SNR_{eff}^{weak} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} (1+xa_i)} - 1,$$
 (10)

$$SNR_{eff}^{strong} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} \left(1 + \frac{b_i}{xa_i + 1}\right)} - 1.$$
(11)

При этом максимальные пропускные способности будут следующими:

$$C^{weak} = \log\left(1 + SNR_{eff}^{weak}\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \log(1 + xa_i),$$

$$C^{strong} = \log\left(1 + SNR_{eff}^{strong}\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \log\left(\frac{b_i + xa_i + 1}{xa_i + 1}\right),$$

$$C^{weak} + C^{strong} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\log(1 + xa_i) + \log\left(\frac{b_i + xa_i + 1}{xa_i + 1}\right)\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \log(b_i + xa_i + 1).$$

Так как  $x \leq 1$ , то при  $b_i > a_i$ ,  $\forall i$  суммарная пропускная способность будет выше, чем при  $b_i < a_i$ . Данные оценки показывают, что с точки зрения суммарной пропускной способности оказывается выгоднее, чтобы сильный сигнал посылал ближний пользователь, а слабый — дальний. Можно предположить, что такое соотношение сохранится и при переходе к СКК и таблице 1. В связи с этим для сохранения эффективности работы упрощенного варианта

алгоритма из раздела 4.2 и уменьшения вариантов перебора предлагается, что при  $h_i^1 > h_i^2$ ,  $\forall i$ , где  $h_i^1$  — канальные коэффициенты станции  $s_1$ ,  $h_i^1$  — канальные коэффициенты станции  $s_2$ , станция  $s_2$  отправляет сильный сигнал, а станция  $s_1$  — слабый. В то же время, если на какихто поднесущих в заданном ресурсном блоке затухание выше у  $s_1$ , а на каких-то выше у  $s_2$ , то следует рассмотреть оба варианта передачи.

Пусть теперь для пары станций  $s_1$  и  $s_2$  выбрано, что  $s_1$  будет передавать слабый сигнал, а  $s_2$  — сильный. Необходимо построить множество допустимых пар СКК  $L_{avail}(s_1, s_2, r)$ , а также для каждой пары из  $L_{avail}(s_1, s_2, r)$  подобрать коэффициент уменьшения мощности слабого сигнала x. Множество  $L_{avail}(s_1, s_2, r)$  состоит из всех пар СКК, на которых возможна успешная передача сигналов, исходя из выражений (10), (11) и таблицы 1, а также из того, чтобы условие (7) было удовлетворено. Далее процесс наполнения  $L_{avail}(s_1, s_2, r)$  описывается более подробно.

Для передачи слабого сигнала выбирается СКК  $l_{weak} \in L$ , на которой возможна успешная одиночная передача точке доступа при использовании полной мощности. Коэффициент x подбирается так, чтобы передача слабого сигнала минимально удовлетворяла требованиям из таблицы 1. Возможными СКК для сильного сигнала являются все СКК  $l_{strong} \in L$ , на которых, исходя из значений SNR (4) и таблицы 1, возможна передача. Если получившиеся мощности приема для заданной пары СКК ( $l_{weak}, l_{strong}$ ) удовлетворяют условию (7), то такая пара добавляется в множество  $L_{avail}(s_1, s_2, r)$ . Стоит отметить, что для удовлетворения условия (4) может потребоваться уменьшение мощности сильного сигнала в пределах выполнения условий из таблицы 1. В итоге во множество  $L_{avail}(s_1, s_2, r)$  добавляются все пары, которые могут быть получены таким способом.

#### 5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы оценить возможности совместного использования NOMA и OFDMA в восходящем канале, построена имитационная модель сети 802.11ах. Точки доступа работают в канале 40 МГц в диапазоне 5 ГГц. Равномерно в радиусе D вокруг точек доступа расположены станции, которые передают конечные потоки пакетов. Размеры потоков задаются усеченным логнормальным распределением с минимальным, средним и максимальным значениями 100 КБ, 5 МБ и 100 МБ соответственно. Время прихода нового потока распределено экспоненциально с минимальным, средним и максимальным значениями 100 КБ, 5 МБ и 100 МБ соответственно. Время прихода нового потока распределено экспоненциально с минимальным, средним и максимальным значениями 1 с, 3 с и 6 с соответственно. В качестве модели канала используется Model-D NLOS с частотно-селективными замираниями [24,25], предлагаемая при моделировании сетей 802.11ах [26]. Максимальная мощность передачи P = 16 дБм. Мощность теплового шума в 20 МГц подканале = -94 дБм. Предельное значение разницы в приходящей мощности  $P_{limit} = 10$  дБ.

Проведена серия экспериментов, в которой сравниваются следующие алгоритмы распределения ресурсов, использующие OFDMA и/или NOMA.

- 1. «OFDMA» жадный алгоритм из работы [14], использующий многопользовательские передачи OFDMA.
- 2. «SU» алгоритм, выбирающий только одну станцию на передачу во всем канале, то есть однопользовательский (англ.: Single User, SU).
- «NOMA» алгоритм, выбирающий пару станций для передачи с помощью NOMA во всем доступном канале.
- 4. «OFDMA + NOMA, жадный» базовый алгоритм, предложенный в разделе 4.2.
- 5. «OFDMA + NOMA, упрощенный» упрощенный алгоритм, предложенный в конце раздела 4.2.

6. «OFDMA + NOMA, полный перебор» — алгоритм, в котором после получения распределения от жадного алгоритма OFDMA происходит полный перебор по всем возможным парам свободная станция / свободный для NOMA ресурсный блок.



Рис. 2. Общая пропускная способность сети, 1 точка доступа



Рис. 3. Средняя длительность передачи потока, 1 точка доступа

На рис. 2–4 представлены значения суммарной пропускной способности сети, средней длительности передачи потока и среднего геометрического пропускной способности в зависимости от количества станций при значениях D = 20 м и D = 35 м. По данным результатам видно, что все алгоритмы, совместно использующие и NOMA и OFDMA, показывают лучшие результаты. Стоит отметить, что разница между ними довольно мала, что означает, что выбранная метрика для сортировки свободных станций  $\phi$  (8) позволяет уменьшить сложность нахождения решения при сохранении его качества. При D = 20 м алгоритм, использующий OFDMA, показывает сравнительно лучше результат, чем при D = 35 м. Это связано с тем, что на больших расстояниях увеличение спектральной плотности мощности при сужении канала играет гораздо более важную роль, чем на малых.

Во второй серии экспериментов исследуем эффективность алгоритмов в условиях интерференции. Для этого рассмотрена сеть из трех точек доступа, расположенных на расстоянии 50 м друг от друга. Результаты показаны на рис. 5–7. Видно, что результаты аналогичны результатам первой серии экспериментов, т.е. совместное использование NOMA и OFDMA то-



Рис. 4. Среднее геометрическое пропускной способности, 1 точка доступа



Рис. 5. Общая пропускная способность сети, 3 точки доступа



Рис. 6. Средняя длительность передачи потока, 3 точки доступа

же позволяет получать преимущество по пропускной способности и длительности передачи потока.

В третьей серии экспериментов исследован получаемый выигрыш от использования NOMA, если рассматривать интерференцию от слабого кадра не как гауссовский шум, а как более мягкую интерференцию, что подтверждается экспериментальными данными [3]. В работе [27] показано, что влияние слабого сигнала зависит от модуляций, используемых для сильного



Рис. 7. Среднее геометрическое пропускной способности, 3 точки доступа



Рис. 8. Общая пропускная способность сети, 1 точка доступа

и слабого сигналов, а также от получающегося отношения в уровне приходящей мощности. Однако в данной работе использована гораздо более простая модель: требуемые значения минимального SNR из таблицы 1 снижались, если интерференция от слабого кадра больше уровня теплового шума. На рис. 8 показаны значения общей пропускной способности сети для алгоритмов, использующих NOMA, при понижении требуемого уровня на 3 дБ. Из-за этого при D = 35 м и большом числе пользователей алгоритм, использующий только NOMA, показывает большую производительность, чем OFDMA. В то же время алгоритм, использующий и OFDMA и NOMA, показывает наилучшую производительность.

#### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована эффективность алгоритмов передачи данных от клиентских станций к точке доступа при использовании различных методов мультиплексирования, включая одновременное использование NOMA и OFDMA. Был предложен алгоритм выделения ресурсов на передачи и управления мощностью. Результаты имитационного моделирования показали, что при совместном использовании NOMA и OFDMA повышается пропускная способность и снижается длительность передачи потока по сравнению с алгоритмами, использующими только OFDMA или NOMA. Также можно сделать вывод, что разработанный алгоритм, получает преимущество за счет различного качества канала в разных ресурсных блоках, увеличения спектральной плотности сигналов, а также за счет большой разницы в канальных условиях между пользователями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- IEEE P802.11ax Standard for Information Technology Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN. 2021.
- Khorov E., Kureev A., Levitsky I. NOMA Testbed on Wi-Fi. IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2018, pp. 1153–1154.
- 3. Khorov E., Kureev A., Levitsky, I., Akyildiz I.F. Prototyping and experimental study of non-orthogonal multiple access in Wi-Fi networks. *IEEE Network*, 2020, vol. 34, no. 4, pp. 210–217.
- 4. Zlobin R., Kureev A., Khorov E. Receiver Design and Frame Format for Uplink NOMA in Wi-Fi. *IEEE Conference on Computer Communications Workshops.* 2022, pp. 1–2.
- Khorov E., Kureev A., Levitsky, I., Akyildiz I.F. A Phase Noise Resistant Constellation Rotation Method and Its Experimental Validation for NOMA Wi-Fi. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, vol. 40, no. 4, pp. 1346–1354.
- Ketonen J., Juntti M., Cavallaro J. R. Performance-complexity comparison of receivers for a LTE MIMO– OFDM system. *IEEE transactions on signal processing*, 2010, vol. 58, no. 6, pp. 3360–3372.
- Al-Hussaibi W.A., Falah A.H. Performance-Complexity Tradeoffs of MIMO-NOMA Receivers Towards Green Wireless Networks. *IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC).* IEEE, 2019, pp. 1–6.
- 8. Schelstraete S. Implicit sounding overhead analysis. IEEE, 2019. Access mode: https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/19/11-19-1268-00-00be-implicit-sounding-overhead-analysis.pptx
- 9. Ali M.S., Tabassum H., Hossain E. Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems. *IEEE Access*, 2016, vol. 4, pp. 6325–6343.
- Li A., Benjebbour A., Chen X., Jiang H., Kayama H. Uplink non-orthogonal multiple access (NOMA) with single-carrier frequency division multiple access (SC-FDMA) for 5G systems. *IEICE Transactions* on Communications, 2015, Vol. 98, no. 8, pp. 1426–1435.
- Xu C., Wu M., Xu Y., Xu Y. Shortest uplink scheduling for NOMA-based industrial wireless networks. *IEEE Systems Journal*, 2020, vol. 14, no. 4, pp. 5384–5395.
- Sharon O., Alpert Y. Scheduling Strategies and Throughput Optimization for the Uplink for IEEE 802.11 ax and IEEE 802.11 ac Based Networks. Wireless Sensor Network, 2017, vol. 9, no. 08, p. 250.
- Bankov D., Didenko A., Khorov E., Lyakhov A. OFDMA uplink scheduling in IEEE 802.11 ax networks. 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018, pp. 1–6.
- Tutelian S., Bankov D., Shmelkin D., Khorov E. IEEE 802.11 ax OFDMA Resource Allocation with Frequency-Selective Fading. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 18, p. 6099.
- Wang K., Psounis K. Efficient scheduling and resource allocation in 802.11 ax multi-user transmissions. Computer Communications, 2020, vol. 152, pp. 171–186.
- Ghazi H.S., Weso?owski K. Uplink NOMA scheme for Wi-Fi applications. International Journal of Electronics and Telecommunications, 2018, vol. 64, no. 4, pp. 481–485.
- Montalban J., Iradier E., Angueira P., Seijo O., Val I. NOMA-based 802.11 n for industrial automation. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 168546–168557.
- Kwon Y., Baek H., Lim J. Uplink NOMA Using Power Allocation for UAV-Aided CSMA/CA Networks. IEEE Systems Journal, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 2378–2381.
- Pavan B.S., Harigovindan V.P. A novel channel access scheme for NOMA based IEEE 802.11 WLAN. Sādhanā, 2021, vol. 46, no. 3, pp. 1–6.
- Oteri K. Power control for multi-user transmission in 802.11ax. IEEE, 2016. Access mode: https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/16/11-16-0331-01-00ax-power-control-for-multi-user-transmission-in-802-11ax.pptx

- Zafar A., Shaqfeh M., Alouini M.S., Alnuweiri H. On multiple users scheduling using superposition coding over Rayleigh fading channels. *IEEE Communications Letters*, 2013, vol. 17, no. 4, pp. 733–736.
- Otao N., Kishiyama Y., Higuchi K. Performance of non-orthogonal multiple access with SIC in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation. *IEICE transactions on communications*, 2015, vol. 98, no. 2, pp. 344–351.
- Hanzaz Z., Schotten H.D. Analysis of effective SINR mapping models for MIMO OFDM in LTE system. 2013 9th international wireless communications and mobile computing conference (IWCMC). IEEE, 2013, pp. 1509–1515.
- 24. Breit G. TGac channel model addendum. IEEE, 2009. Access mode: https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/09/11-09-0308-03-00ac-tgac-channel-model-addendumdocument.doc
- 25. Liu J. TGax channel model. IEEE, 2014. Access mode: https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0882-04-00ax-tgax-channel-model-document.docx
- 26. Merlin S. TGax simulation scenarios. IEEE, 2015. Access mode: https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0980-14-00ax-simulationscenarios.docx
- Endovitskiy E.O., Kureev A.A., Levitsky I.A., Tutelian S.A., Khorov E.M. Performance Evaluation of Downlink Non-Orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks. *Journal of Communications Technology* and Electronics, 2021, vol. 66, no. 12. pp. 1485–1490.

# Joint Usage of OFDMA and NOMA for Uplink Transmissions in Wi-Fi Networks

## S.A. Tutelian, E.M. Khorov

The number of wireless devices, as well as their traffic volumes are constantly growing, which degrades the quality of service. To combat this problem, the new Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) standard introduces the OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) mechanism, which allows coordinated multiuser frequency division transmissions. Also, another user multiplexing mechanism, namely, non-orthogonal multiple access has been proposed for future Wi-Fi networks. This mechanism allows multiple users to transmit on the same frequencies simultaneously and separate different signals by power level. This paper considers the joint usage of these mechanisms for uplink transmissions in Wi-Fi 6 networks and set the problem of optimal radio resource allocation between users to maximize some utility function, for example, the geometric mean throughput. To solve it, we propose an algorithm that takes into account the channel frequency selectivity and uses OFMDA and NOMA simultaneously. It is shown that the joint usage of OFDMA and NOMA can significantly increase the network throughput and reduce delays.

KEYWORDS: non-orthogonal multiple access, radio resource allocation, Wi-Fi.