

Исследование методов сбора канальной информации в сетях Wi-Fi D-MIMO¹

Е.А. Голубев^{*,**}, В.А. Логинов^{*,***}, С.А. Тутельян^{*}

^{*}Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва

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

^{***}Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

Поступила в редколлегию 01.12.2024 г. Принята 12.12.2024 г.

Аннотация—Число пользователей и объемы трафика в современных беспроводных сетях Wi-Fi постоянно растут, поэтому возникает необходимость повышения их пропускной способности. Одним из перспективных способов решения этой проблемы является использование распределенных многоантенных передач (англ.: Distributed Multiple Input Multiple Output, D-MIMO). Для использования D-MIMO передач требуется периодически проводить достаточно длительную процедуру сбора канальной информации, что увеличивает накладные расходы. В данной работе для сетей Wi-Fi D-MIMO разработаны новые алгоритмы сбора канальной информации, использующие технологию множественного доступа с ортогональным частотным разделением (англ.: Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) и учитывающие частотную селективность канала, а также возможную интерференцию при передаче информации. При помощи имитационного моделирования показано, что предложенные алгоритмы позволяют существенно сократить длительность процедуры сбора канальной информации и, как следствие, увеличить пропускную способность сети по сравнению с решениями из литературы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: OFDMA, D-MIMO, CSI, explicit sounding.

DOI: 10.53921/18195822_2024_24_4_361

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день сети Wi-Fi широко распространены, и для удовлетворения растущих потребностей пользователей необходимо повышать их пропускную способность. Одним из перспективных методов повышения пропускной способности сети, которые рассматриваются в рамках стандартизации Wi-Fi 8 [1, 2], является использование технологии распределенной многоантенной передачи (англ.: Distributed Multiple Input Multiple Output, D-MIMO), которая позволяет нескольким точкам доступа одновременно передавать информацию станциям. При осуществлении D-MIMO передачи все точки доступа виртуально объединяются в одну логическую точку доступа с большим числом антенн, которая обслуживает пользовательские станции (англ.: Station, STA) при помощи MIMO. При этом составление расписания передач обычно происходит на одной из точек доступа, которая называется главной точкой доступа (англ.: Main Access Point, M-AP), а остальные точки доступа называются вторичными (англ.: Secondary Access Point, S-AP). С учетом того, что при таком типе координации необходим интенсивный обмен служебной информацией между точками доступа, в данной работе будем предполагать, что все точки доступа имеют проводное соединение между собой, которое может быть построено, например, при помощи технологии FTTR (англ. Fiber to the room) [3].

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00756, <https://rscf.ru/project/23-19-00756/>.

При использовании D-MIMO главная точка доступа для каждой передачи строит матрицы прекодера, эффективность которых сильно зависит от актуальности имеющейся информации о канале (англ.: Channel State Information, CSI) между точками доступа и станциями. Согласно стандарту Wi-Fi, при использовании технологии MIMO точка доступа получает информацию о канале посредством процедуры явной передачи канальной информации (англ.: Explicit sounding, ES). При использовании ES точка доступа посылает кадр NDP (англ.: null data packet), по которому можно оценить канал, после чего станции посылают CSI точке доступа.

Технология D-MIMO позволяет использовать возросшее число антенн на логической точке доступа как для одновременного обслуживания большого числа станций, так и для повышения отношения сигнал/шум [4], однако при этом объем CSI значительно возрастает. Стоит отметить, что увеличение длительности процедуры сбора CSI влечет за собой уменьшение пропускной способности сети, так как не позволяет проводить процедуру часто [5], что приводит к тому, что канальная информация в среднем становится менее актуальной [6].

Методы координации между точками доступа еще находятся в стадии разработки, и возможным решением проблемы сбора CSI может стать использование процедуры неявного сбора CSI (англ.: Implicit sounding, IS) [7–11]. В отличие от ES, при использовании IS станции посылают NDP точке доступа, и точка доступа оценивает канал, что позволяет сократить длительность процедуры сбора CSI. Недостатком IS является необходимость использования алгоритмов калибровки [7], разработка которых для сетей Wi-Fi MIMO является открытой задачей.

Существенно сократить длительность процедуры ES можно при помощи использования технологии множественного доступа с ортогональным частотным разделением (англ.: Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) [12, 13]. При помощи OFDMA весь доступный канал можно разделить между разными пользователями, и станции могут одновременно передавать CSI точке доступа в разных частях полосы. В реальных условиях канал может обладать частотной селективностью из-за замираний [14], приводящих к тому, что качество канала в разных участках полосы частот существенно отличается. Это можно учитывать, используя OFDMA и выделяя каждой станции лучшие частотные полосы для передачи.

Целью данной работы является разработка и анализ методов уменьшения длительности процедуры сбора CSI при помощи OFDMA в сетях Wi-Fi D-MIMO. В работе предлагаются алгоритмы распределенного сбора CSI, учитывающие частотную селективность канала, и проводится сравнение с решением из литературы [15].

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 дано описание процедуры явной передачи информации о канале в сетях Wi-Fi D-MIMO, а также описана технология OFDMA. Раздел 3 содержит обзор литературы. Раздел 4 содержит описание модели и постановку задачи. В разделе 5 описываются предлагаемые алгоритмы для решения поставленной задачи. В разделе 6 приведены сценарии и параметры экспериментов, а также численные результаты. Раздел 7 содержит заключение.

2. ПРОЦЕДУРА ЯВНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ О КАНАЛЕ

2.1. Схема процедуры

Рассмотрим сеть Wi-Fi, в которой выполняется передача от точек доступа к станциям с помощью D-MIMO. Пусть H_u^i — оценка канальной матрицы между совокупностью всех точек доступа и станцией u на поднесущей i . Данная матрица составляется из соответствующих канальных матриц между отдельными точками доступа и станцией. Канальная матрица перед передачей предварительно сжимается, для чего она представляется сингулярным разложением

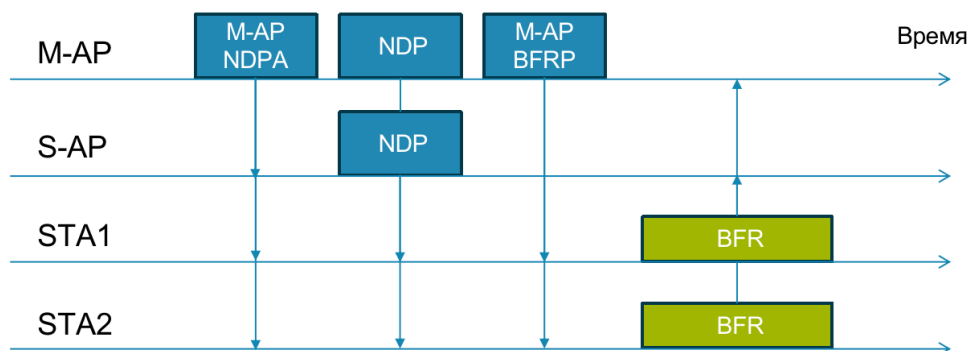


Рис. 1. Схема процедуры явной передачи информации о канале

$H_u^i = USV^*$. Матрица V представляется в виде набора углов ψ и ϕ , после чего они квантуются с заданной разрядностью и передаются. Указанные углы составляют основной объем CSI, но также передаются средние значения отношений сигнал/шум для каждого пространственного потока. В литературе описаны различные решения для сжатия углов, позволяющие уменьшить размер CSI [16, 17], однако в данной статье будем предполагать, что устройства используют представление углов, описанное в стандарте.

Рассмотрим более подробно обмен кадрами при явной передаче информации о канале в сетях Wi-Fi D-MIMO. Возможная схема процедуры [4] для стандарта 802.11bn показана на рис. 1.

При ее использовании сначала M-AP посылает кадр M-AP NDPA (англ.: null data packet announcement) станциям, от которых требуется получить CSI. В нем перечислены участвующие в процедуре точки доступа, а также для каждой станции указаны свои параметры CSI: размер группы поднесущих, разрядность квантования углов, и другие. После получения кадра M-AP NDPA точки доступа синхронно передают кадр NDP, с помощью которого станции одновременно оценивают канал между каждой точкой доступа и собой. Затем M-AP делит станции на группы, которые будут передавать CSI одновременно. Такие одновременные передачи могут быть выполнены с помощью OFDMA или MU-MIMO в восходящем канале. В данной работе не рассматривается использование MU-MIMO в восходящем канале из-за того, что поддержка MU-MIMO в восходящем канале не является обязательной для Wi-Fi устройств. Поэтому в рамках данного исследования для одновременной передачи CSI используется OFDMA.

После этого M-AP посылает этой группе кадр M-AP BFRP (англ.: beamforming report poll), содержащий запрос на получение CSI от станций. Получив такой запрос, каждая станция из группы отправляет кадр BFR (англ.: beamforming report), содержащий CSI в сжатой форме. Точки доступа принимают BFR одновременно от всех станций группы, далее все S-AP отправляют M-AP данную информацию по проводному соединению.

2.2. Использование OFDMA в процедуре

Технология OFDMA была добавлена в стандарт Wi-Fi в рамках дополнения IEEE 802.11ax. При использовании OFDMA, доступный канал может быть разделен на несколько сегментов, называемых ресурсными блоками (РБ). Схема распределения РБ для канала шириной 20 МГц представлена на рис. 2. Ресурсные блоки могут иметь следующие размеры: 26, 52, 106, 242, 484, 996 или 2×996 поднесущих (тонов). Канал может быть представлен как совокупность указанных ресурсных блоков. Например, канал шириной 20 МГц может быть представлен одним ресурсным блоком с 242 поднесущими, или состоящим из двух ресурсных блоков с 106

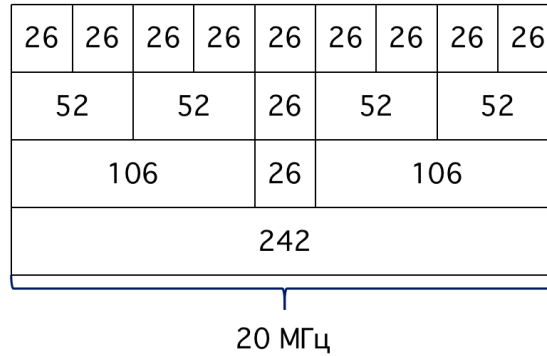


Рис. 2. Схема ресурсных блоков в канале 20 МГц

поднесущими и одним с 26 поднесущими, или из четырех ресурсных блоков с 52 поднесущими и одним с 26 поднесущими, и т.д.

При составлении расписания OFDMA-передачи точка доступа должна назначить РБ станциям, учитывая следующие ограничения:

1. каждой станции может быть выделено не более одного РБ (требование стандарта);
2. один и тот же участок полосы не может быть выделен двум и более станциям на одновременную передачу одной точке доступа для успешного приема кадров, так как в работе не рассматривается MU-MIMO в восходящем канале.

Для того чтобы использовать OFDMA в восходящем канале, точка доступа должна послать триггер-кадр. Этот кадр содержит информацию о выделяемом РБ для каждой станции, а также параметры передачи, такие как число пространственных потоков и сигнально-кодовая конструкция (СКК). Заметим, что кадры BFRP являются триггер-кадрами.

При использовании OFDMA сразу несколько станций передают BFR параллельно, образуя тем самым триггер-группу: совокупность станций, одновременно передающих в канале. Станции, которым выделены ресурсы, передают в соответствующих РБ. При этом в случае D-MIMO также можно выбирать, какой точке доступа станция передает данные, так как S-AP могут передавать полученные ими CSI главной точке доступа по проводному соединению. Также в триггер-кадре передается время окончания передачи, которое определяется по максимальной длительности передачи из всех станций одной триггер-группы. Длительность передачи станции какой-либо точке доступа может различаться для разных РБ из-за того, что скорость передачи станции в РБ зависит от его размера и текущего качества канала в нем. Таким образом, выделяя станциям подходящие РБ и AP, можно сократить длительность передачи CSI триггер-группой, а следовательно, и всей процедуры сбора канальной информации.

3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Обычно в литературе процедура явной передачи информации о канале для сетей Wi-Fi D-MIMO рассматривается поверхностно, и главной целью является реализация рабочей процедуры в имитационной модели сети без оптимизации ее длительности [18]. Также в ряде работ [8, 10, 11] рассматривается процедура неявного сбора CSI, однако в ней возникают проблемы, связанные с несимметричностью восходящего и нисходящего канала из-за неидеальности приемопередатчиков. Для борьбы с этим эффектом необходимы алгоритмы калибровки

нисходящего и восходящего каналов [7], разработка которых для случая сетей Wi-Fi D-MIMO является открытой задачей.

Тем не менее, существуют работы [9, 19], в которых рассматривается процедура явной передачи информации о канале для сетей с координацией точек доступа. Однако в данных работах не учитывается частотная селективность канала, а также возможность организации нескольких триггер-групп для отправки CSI. В работе [20] также исследуется процедура явной передачи информации о канале, но рассматривается реализация, не совместимая со стандартом Wi-Fi.

В работах [15, 18] рассматриваются алгоритмы распределения ресурсов в процедуре сбора CSI в сетях 802.11ax. Однако в работе [18] не учитывается частотная селективность канала, а также рассматривается только случай использования одной триггер-группы в процедуре сбора CSI. В работе [15] рассматривается жадный алгоритм планирования ресурсов при сборе CSI с учетом частотной селективности канала и использования OFDMA. Однако алгоритм из работы [15] был разработан только для сетей с одной точкой доступа и не учитывает возможность выбора точки доступа, которой каждая станция будет передавать CSI. Также этот алгоритм не учитывает возможное наличие интерференции при одновременной передаче CSI различными станциями разным точкам доступа в одном участке частотной полосы.

В отличие от описанных выше исследований, в данной работе был впервые предложен алгоритм сбора CSI с использованием OFDMA для сетей Wi-Fi D-MIMO, который учитывает возможность создания нескольких триггер-групп, частотную селективность канала, а также возможность выбора принимающей точки доступа для каждой станции.

4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Опишем более подробно математическую постановку задачи минимизации длительности процедуры сбора CSI в сетях D-MIMO.

Пусть для каждой станции известен набор параметров CSI (число антенн, разрядность квантования углов, и т.д.), который задает объем CSI. Пусть также главная точка доступа может для каждой станции в каждом РБ для каждой точки доступа вычислить наиболее скоростные СКК и число пространственных потоков, исходя из канальных условий и возможной интерференции от других станций. Отметим, что СКК и число пространственных потоков могут различаться для разных ресурсных блоков, пользователей и точек доступа ввиду возможной интерференции и частотной селективности канала.

Если определены СКК и число пространственных потоков, то для любой станции s из множества всех станций S , для любого РБ r из множества всех РБ R и для любой точки доступа p из множества всех точек доступа P определена длительность передачи CSI $\tau_{s,r,p}(S_s)$, где S_s — множество всех пользователей, передающих информацию одновременно с пользователем s .

Сформулируем задачу разбиения пользователей на триггер-группы, выделения РБ и назначения точки доступа для уменьшения длительности процедуры явного сбора канальной информации в виде задачи упаковки предметов в контейнеры минимальной стоимости. В рамках рассматриваемой постановки контейнером является триггер-группа, объемом контейнера — общая ширина полосы W , предметом — передача одного пользователя одной точке доступа в выделенном РБ. При этом стоимостью предмета является длительность его передачи, а стоимость контейнера — максимальная стоимость помещенного в него предмета.

Введем несколько дополнительных параметров. Пусть параметр $x_{s,k}$ соответствует распределению пользователей по контейнерам, т.е. $x_{s,k} = 1$, только если предмет s распределен в контейнер k , в остальных случаях $x_{s,k} = 0$. Аналогично, параметр $y_{s,r,p}$ определяет распределение пользователей по РБ и точкам доступа, то есть $y_{s,r,p} = 1$ означает, что пользователь s

передает точке доступа p в выделенном РБ r . Объемом предмета является ширина w_r выделенного РБ r . Каждый непустой контейнер соответствует одной триггер-группе, все контейнеры имеют одинаковый объем.

Пусть m — число точек доступа, n — число пользователей и, соответственно, максимальное число непустых контейнеров. Заметим, что число непустых контейнеров равно n , если все триггер-группы содержат по одному пользователю. Также отметим, что если контейнер пуст, то это означает, что в данной триггер-группе отсутствуют станции, и сбор CSI для нее не проводится, а значит, она не влияет на длительность сбора CSI.

Задачу можно записать следующим образом:

$$\min \left(\sum_{k=1}^n \max_{s \in S} \left(x_{s,k} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \tau_{s,r,p}(S_s) y_{s,r,p} \right) + \sum_{k=1}^n T_k \right), \quad (1)$$

$$\forall s, r, k, p : x_{s,k} \in \{0, 1\}, y_{s,r,p} \in \{0, 1\}, \quad (2)$$

$$\forall s : \sum_{k=1}^n x_{s,k} = 1, \quad (3)$$

$$\forall s : \sum_{p \in P} \sum_j y_{s,r,p} = 1, \quad (4)$$

$$\forall k, p : \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} w_r x_{s,k} y_{s,r,p} \leq W, \quad (5)$$

$$\forall k, p, s_1, s_2, r_1, r_2 : x_{s_1,k} = x_{s_2,k} = 1, y_{s_1,r_1,p} = y_{s_2,r_2,p} = 1 \Rightarrow r_1 \cap r_2 = \emptyset. \quad (6)$$

Переменная T_k определяет накладные расходы на передачу триггер-кадра, соответствующего триггер-группе k , двух промежутков SIFS (англ.: Short Interframe Space) и заголовков пакетов. Если контейнер k является пустым, то $T_k = 0$.

Условия (3)–(6) имеют следующий смысл:

- Условие (3) означает, что каждый предмет должен быть распределен, причем в один контейнер.
- Условие (4) означает, что берется только один вариант предмета (для каждой станции можно выбрать только один РБ и точку доступа).
- Условие (5) означает ограничение по размеру контейнера (ограничение выделяемых РБ по ширине полосы).
- Условие (6) означает, что один и тот же РБ не может быть выделен двум любым станциям, которые должны передавать одной и той же точке доступа. Таким образом, возможны пересечения по РБ для разных точек доступа.

Точное решение задачи имеет экспоненциальную сложность от числа станций, поэтому оно является вычислительно затратным. В связи с этим в данной работе был разработан жадный алгоритм для приближенного решения задачи (1).

5. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ АЛГОРИТМ

Алгоритм использует жадный подход добавления станций. Схема алгоритма выглядит следующим образом.

Сначала вычисляются длительности передачи от станции до каждой точки доступа во всем канале и определяется наименьшая длительность передачи, после чего станции сортируются по убыванию длительности процедуры сбора CSI. Затем отсортированный список станций

подается на вход планировщику РБ, который добавляет их в расписание процедуры сбора CSI последовательно. Стоит отметить, что при добавлении станции изменяется интерференция в канале, в результате чего планировщик РБ заново назначает СКК станциям, РБ которых были затронуты изменением интерференции, и делает перерасчет длительностей передачи.

Опишем более подробно работу планировщика РБ. Для этого введем понятие пары «РБ, точка доступа» — назначенный станции РБ для передачи конкретной точке доступа. Первой станции из списка выделяется РБ максимального размера и выбирается лучшая точка доступа для передачи, обеспечивающие минимальную длительность процедуры сбора CSI.

Пусть уже добавлено k станций, рассмотрим добавление станции i . Считается длительность процедуры для трех вариантов добавления:

1. Выделение станции лучшей пары «РБ, точка доступа», где РБ максимального размера. При этом создается новая триггер-группа, либо ресурсы выделяются в уже существующей триггер-группе, в которой на назначенную точку доступа никакая другая станция не передавала.
2. Выделение станции ранее занятого РБ, который делится между двумя станциями. Для разделения выбирается такой РБ, в котором назначенная в текущем распределении станция имеет минимальную длительность передачи среди всех назначений. В разделение РБ рассматриваются сам РБ и составляющие его РБ первого уровня, то есть максимально большие РБ, составляющие его (например, у 242-тонового РБ такими РБ будут являться два 106-тоновых и один 26-тоновый РБ). Станции распределяются по указанным РБ и составляют пары «РБ, точка доступа» таким образом, чтобы длительность передачи данной триггер-группы была минимальной.
3. Выделение станции лучшей пары «РБ, точка доступа», где РБ выбирается из незанятых на передачу выбранной точке доступа 26-тоновых РБ.

В итоге выбирается вариант с наименьшей итоговой длительностью процедуры получения CSI.

В работе также предлагается алгоритм с ортогональным разделением РБ, отличающийся от указанного выше тем, что не допускается наличие интерференции при передаче информации в рамках одной триггер-группы. В этом случае для одной триггер-группы отсутствуют пересечения по РБ для всех станций и точек доступа.

6. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки эффективности предлагаемого алгоритма были построена имитационная модель сети D-MIMO в среде имитационного моделирования ns-3.

Рассмотрим сеть, состоящую из m точек доступа и n станций. Точки доступа расположены в вершинах правильного многоугольника вписанного в окружность с радиусом R_{AP} и соединены между собой проводным соединением, по которому вся информация передается мгновенно.

Будем рассматривать два сценария расположения станций:

Сценарий № 1: станции расположены равномерно внутри круга с радиусом R_{AP} , описанного вокруг многоугольника точек доступа.

Сценарий № 2: станции расположены равномерно внутри кругов радиусом R_{STA} вокруг каждой точки доступа, число станций около каждой точки доступа одинаково.

Рассматриваются каналы шириной 40 МГц и 80 МГц. Число антенн на станциях равно 2, точки доступа имеют по 4 антенны. Параметры CSI имеют следующие значения: число бит на угол ϕ равно 9, на угол ψ равно 7, группировка осуществляется по 4 поднесущим.

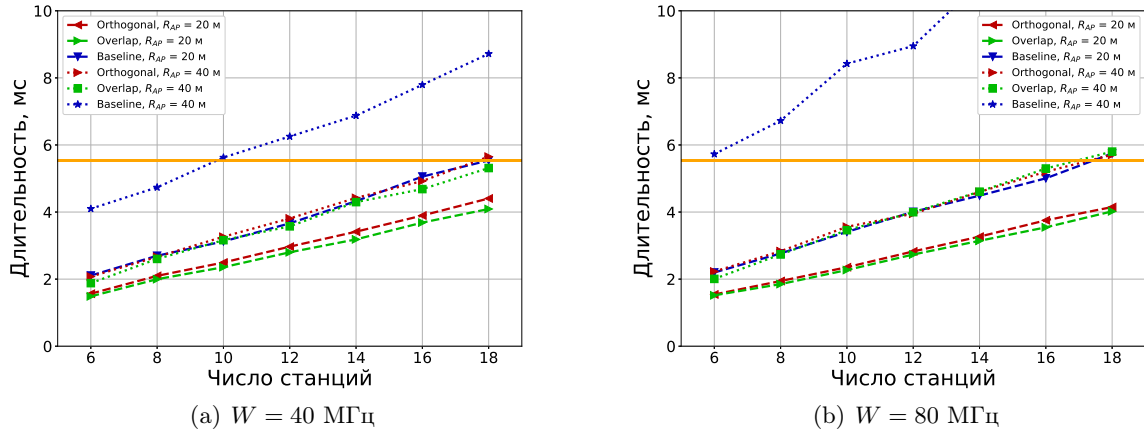


Рис. 3. Длительность процедуры сбора CSI для сценария № 1 и $m = 3$ точек доступа при различной ширине канала

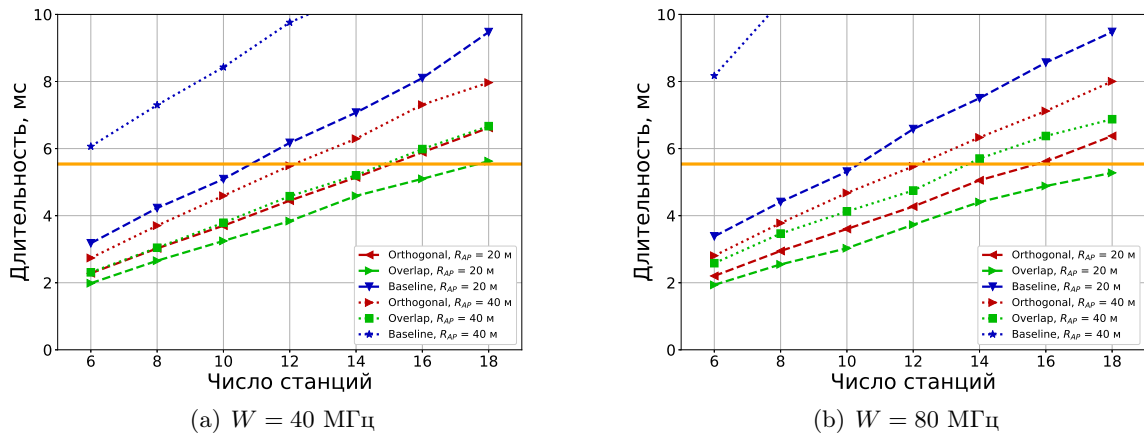


Рис. 4. Длительность процедуры сбора CSI для сценария № 1 и $m = 5$ точек доступа при различной ширине канала

В экспериментах используется модель канала «Model B NLOS» с частотно-селективными замираниями [21], рекомендуемая IEEE при моделировании сетей Wi-Fi MIMO. Затухание сигнала PL вычисляется по следующей формуле:

$$PL(d) = 40.05 + 20 \log_{10}\left(\frac{5}{2.4}\right) + 20 \log_{10}(\min(d, 5)) + \mathbb{1}(d > 5) \cdot 35 \log_{10}\left(\frac{d}{5}\right), \quad (7)$$

где PL измеряется в дБ, d — расстояние от точки доступа до станции в метрах, $\mathbb{1}(d > 5)$ — индикаторная функция.

На графиках описанный в разделе 5 алгоритм обозначается «Overlap», а упомянутый в конце раздела 5 алгоритм с ортогональным разделением обозначается «Orthogonal». Алгоритм из работы [15] был адаптирован для сценария D-MIMO и обозначается «Baseline». При использовании «Baseline» главная точка доступа самостоятельно собирает CSI со всех станций, другие точки доступа участвуют только в передаче NDP.

На рис. 3 и 4 показана длительность процедуры сбора CSI для сценария № 1 в зависимости от числа станций, которые должны передать CSI. Кривые длительностей построены для двух

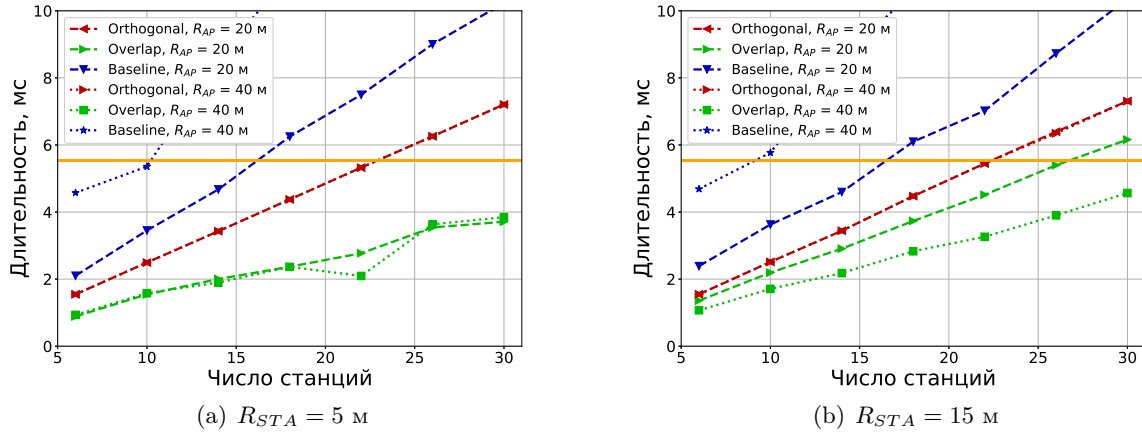


Рис. 5. Длительность процедуры сбора CSI для сценария № 2, $m = 3$ точек доступа и ширине канала $W = 40$ МГц

значений радиуса R_{AP} . Также для сравнения на всех графиках присутствует горизонтальная линия на уровне 5,5 мс, соответствующая ограничению на максимальную длительность передачи кадра в сетях Wi-Fi [22].

Видно, что с увеличением R_{AP} растет и выигрыш в длительности предлагаемых алгоритмов по отношению к «Baseline»: до 40% при $R_{AP} = 20$ м и до 50% при $R_{AP} = 40$ м. Это связано с тем, что при больших значениях R_{AP} в среднем увеличивается затухание сигнала, что приводит к значительному росту длительности передач при использовании «Baseline», в то время как выбор принимающей точки доступа в методах «Overlap» и «Orthogonal» позволяет использовать более скоростные СКК. Также можно заметить, что зависимость длительности процедуры от числа станций линейная для всех алгоритмов. Отметим, что сценарий № 1 не является выгодным для работы алгоритма «Overlap» по сравнению с «Orthogonal», потому что станции распределяются довольно плотно, и, как следствие, при использовании разными станциями одного и того же РБ часто возникает значительная интерференция, которая не позволяет получить выигрыш от возможности использования одновременных передач в этом РБ. Влияние этой интерференции можно частично компенсировать при помощи методов современной теории кодирования [23, 24], но они еще не вошли в стандарт Wi-Fi. Поэтому на данный момент наблюдается лишь небольшой выигрыш в длительности процедуры сбора CSI между алгоритмами «Overlap» и «Orthogonal».

На рис. 5 представлены длительности процедуры для сценария № 2 в зависимости от числа станций для канала 40 МГц, показаны результаты для разных радиусов R_{STA} . Видно, что в этом сценарии алгоритм «Overlap» существенно снижает длительность процедуры сбора CSI по сравнению с «Orthogonal». Это связано с тем, что в этом сценарии станции, находящиеся в кругах вокруг разных точек доступа, слабо интерферируют между собой, поэтому для передачи выгодно выбирать пересекающиеся РБ для разных точек доступа.

Также можно заметить, что длительность процедуры, работающей согласно алгоритму «Orthogonal», одинакова для разных радиусов R_{AP} и одного радиуса R_{STA} . Это связано с тем, что были выбраны такие R_{AP} и R_{STA} , при которых окружности с центром в точках доступа не пересекаются, из-за чего станции всегда передают CSI ближайшей точке доступа.

По графикам видно, что для $R_{STA} = 15$ метров выигрыш снижается, потому что в этом случае станции располагаются ближе к точкам доступа, на которые они не передают, из-за чего растет интерференция и понижается эффективность работы алгоритма «Overlap».

Таким образом, алгоритмы «Orthogonal» и «Overlap» работают гораздо эффективнее алгоритма «Baseline». При этом в сценариях с близким расположением пользователей можно отдавать предпочтение алгоритму «Orthogonal». Предложенные алгоритмы способны существенно сократить длительность процедуры сбора CSI по сравнению с «Baseline»: до 50% в сценарии № 1 и до 60% в сценарии № 2 для алгоритма «Orthogonal», а алгоритм «Overlap» дополнительно к этому способен сократить длительность процедуры до 50% по отношению к алгоритму «Orthogonal» в сценарии № 2.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была рассмотрена проблема сбора канальной информации в сетях Wi-Fi, использующих технологию D-MIMO. Было предложено два алгоритма распределения канальных ресурсов в процедуре явной передачи информации о канале, использующих OFDMA. Рассматривалось два сценария расположения точек доступа и станций с частотно-селективными замираниями канала. Результаты имитационного моделирования показали, что предлагаемые алгоритмы способны более чем в два раза сократить длительность процедуры сбора канальной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reshef Ehud, Cordeiro Carlos. Future directions for Wi-Fi 8 and beyond // *IEEE Communications Magazine*. — 2022. — Vol. 60, no. 10. — P. 50–55.
2. What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11bn ultra high reliability / Galati-Giordano Lorenzo, Geraci Giovanni, Carrascosa Marc, and Bellalta Boris // *IEEE Communications Magazine*. — 2024. — Vol. 62, no. 8. — P. 126–132.
3. Wireless Access Technology in FTTR Next Generation Home Networks: an Overview / Chang Tianhai, Si Xiaoshu, Wang Xiang, Chen Yunman, Gan Shuang, and Caire Giuseppe // *IEEE Wireless Communications*. — 2023. — Vol. 30, no. 5. — P. 44–49.
4. Levinbook Yoav, Ezri Doron, Melzer Ezer. AP cooperation in Wi-Fi: Joint transmission with a novel precoding scheme, resilient to phase offsets between transmitters // *Signal Processing*. — 2024. — Vol. 220. — P. 109432.
5. Impact of Explicit Channel Sounding Period on the Wi-Fi MU-MIMO Performance / Endovitskiy Egor, Tutelian Sergei, Chemrov Kirill, Loginov Vyacheslav, and Khorov Evgeny // *2024 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) / IEEE*. — 2024. — P. 78–83.
6. Study of CSI Compression Influence on MU-MIMO Efficiency under Channel Aging / Barannikov AV, Levitsky IA, Loginov VA, Troegubov A Yu, and Khorov EM // *Journal of Communications Technology and Electronics*. — 2024. — P. 1–10.
7. A comparison of implicit and explicit channel feedback methods for MU-MIMO WLAN systems / Lou Hanqing, Ghosh Monisha, Xia Pengfei, and Olesen Robert // *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) / IEEE*. — 2013. — P. 419–424.
8. IEEE 802.11 be Wi-Fi 7: New challenges and opportunities / Deng Cailian, Fang Xuming, Han Xiao, Wang Xianbin, Yan Li, He Rong, Long Yan, and Guo Yuchen // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2020. — Vol. 22, no. 4. — P. 2136–2166.
9. Multi-AP coordination phy/mac management for industrial Wi-Fi / Lacalle Guillermo, Val Iñaki, Seijo Óscar, Mendicute Mikel, Cavalcanti Dave, and Perez-Ramirez Javier // *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) / IEEE*. — 2022. — P. 1–8.
10. Real-time distributed MIMO systems / Hamed Ezzeldin, Rahul Hariharan, Abdelghany Mohammed A, and Katabi Dina // *Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference*. — 2016. — P. 412–425.

11. Study of Implicit Sounding Feedback in Wi-Fi Networks / Endovitskiy EO, Klimakov AV, Loginov VA, Khorov EM, and Shmelkin DA // *Journal of Communications Technology and Electronics*. — 2022. — Vol. 67, no. Suppl 2. — P. S233–S240.
12. IEEE 802.11 ax uplink scheduler to minimize delay: A classic problem with new constraints / Bankov Dmitry, Didenko Andre, Khorov Evgeny, Loginov Vyacheslav, and Lyakhov Andrey // 2017 IEEE 28th annual international symposium on personal, indoor, and mobile radio communications (PIMRC) / IEEE. — 2017. — P. 1–5.
13. Will OFDMA improve the performance of 802.11 WiFi networks? / Avallone Stefano, Imputato Pasquale, Redieteb Getachew, Ghosh Chittabrata, and Roy Sumit // *IEEE Wireless Communications*. — 2021. — Vol. 28, no. 3. — P. 100–107.
14. Гвоздарев А. С, Артёмова Т. К, Морковкин А. В. Анализ поведения коэффициента выигрыша от компенсации многолучевости в условиях многопутевого канала с двукратным рэлеевским рассеянием и затенением компоненты прямой видимости // *Проблемы передачи информации*. — 2024. — Т. 60, № 2. — С. 12–24.
15. Reducing Duration of the MU-MIMO CSI Acquisition Procedure in Wi-Fi Networks With OFDMA / Golubev Yegor, Tutelian Sergei, Loginov Vyacheslav, and Khorov Evgeny // 2023 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN) / IEEE. — 2023. — P. 395–400.
16. Improved MU-MIMO performance for future 802.11 systems using differential feedback / Porat Ron, Ojard Eric, Jindal Nihar, Fischer Matthew, and Erceg Vinko // 2013 Information Theory and applications workshop (ITA) / IEEE. — 2013. — P. 1–5.
17. CSI Compression Method With Dual Differential Feedback for Next-Generation Wi-Fi Networks / Barannikov Andrey, Levitsky Ilya, Loginov Vyacheslav, and Khorov Evgeny // *IEEE Wireless Communications Letters*. — 2024.
18. Zhang Jingyuan, Avallone Stefano, Blough Douglas M. Implementation and Evaluation of IEEE 802.11 ax Channel Sounding Frame Exchange in ns-3 // *Proceedings of the 2023 Workshop on ns-3*. — 2023. — P. 10–18.
19. Nakazato Tatsuya, Kawamoto Yuichi, Kato Nei. Radio access control of access points and intelligent reflecting surfaces for data rate improvement in joint transmission // 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference:(VTC2022-Spring) / IEEE. — 2022. — P. 1–5.
20. Rahul Hariharan Shankar, Kumar Swarun, Katabi Dina. JMB: Scaling wireless capacity with user demands // *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. — 2012. — Vol. 42, no. 4. — P. 235–246.
21. TGax channel model. — 2014. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0882-04-00ax-tgax-channel-model-document.docx> (online; accessed: 7 June 2021).
22. 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. — 2.
23. Effective Error Floor Estimation Based on Importance Sampling with the Uniform Distribution / Uglovskii A.Y., Melnikov I.A., Alexeev I.A., and Kureev A.A. // *Problems of Information Transmission*. — 2023. — Vol. 59, no. 4. — P. 217–224.
24. Амирзаде Ф., Панарио Д., Садеги М. Р. Квантовые квазициклические МПП-коды с весом столбцов не менее 3 имеют обхват не выше 6 // *Проблемы передачи информации*. — 2024. — Т. 60, № 2. — С. 3–11.

Study of Channel State Information Acquisition Methods in Wi-Fi D-MIMO Networks

Ye.A. Golubev, V.A. Loginov, S.A. Tutelian

The number of users and the volume of served traffic in modern wireless networks are constantly growing, so there is a need to increase their capacity. Distributed Multiple Input Multiple Output (D-MIMO) technology is one of the most promising ways to accomplish this task. To use D-MIMO, a periodic channel state information (CSI) acquisition procedure is required. In this paper, we have developed new algorithms for CSI acquisition. They use Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) technology and take into account the frequency selectivity of the channel, as well as possible interference during the transmission. By simulation, it is shown that the proposed algorithms can significantly reduce the duration of the CSI acquisition procedure and, as a consequence, increase the network throughput compared to solutions from the literature.

KEYWORDS: OFDMA, D-MIMO, CSI, explicit sounding.