

Исследование влияния сжатия CSI на эффективность MU-MIMO в условиях временной эволюции канала¹

А.В. Баранников^{*,**}, И.А. Левицкий^{*}, В.А. Логинов^{*,***},
А.Ю. Троегубов^{*,**}, Е.М. Хоров^{*}

**Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук*

***Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

****Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

Поступила в редколлегию 31.10.2023. Принята 1.12.2023.

Аннотация—Технология MU-MIMO (англ. Multi-User Multiple Input Multiple Output) позволяет повысить пропускную способность канала, но ее эффективность снижается из-за накладных расходов, связанных с частым измерением канала и передачей кадров с информацией о канале. В этой статье рассматриваются проблемы сжатия информации о состоянии канала (англ. channel state information, CSI) в сетях Wi-Fi, использующих MU-MIMO в условиях устаревания канала. Цель исследования — экспериментально проверить эффективность технологии MU-MIMO в реальных сценариях использования, с учетом процедур измерения канала и передачи CSI. С помощью экспериментальной установки проводится запись канала, анализируется поведение канала и изменение мощности принимаемого сигнала при разных условиях. Кроме того, исследуются границы применимости модели TGax канала MU-MIMO в среде WLAN Toolbox путем сравнения с экспериментально полученными результатами. Выводы данного исследования особенно полезны при оптимизации производительности MU-MIMO в условиях временной эволюции канала и сжатия CSI.

Ключевые слова: CSI, MU-MIMO, сжатие информации о канале, устаревание канала.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_4_555

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие приложений беспроводной связи ставит перед научным сообществом и стандартизационными органами амбициозные цели по совершенствованию существующих механизмов использования канальных ресурсов. Одной из наиболее востребованных технологий, позволяющих значительно повысить пропускную способность с помощью эффективного использования канальных ресурсов, является MU-MIMO (англ. Multi-User Multiple Input Multiple Output). Поддержка технологии MU-MIMO появилась в стандарте IEEE 802.11ac для нисходящего канала и с тех пор совершенствуется.

Механизм измерения канала является ключевым для работы MU-MIMO. Он требуется для получения информации о состоянии канала, которая используется передатчиком для формирования прекодера MU-MIMO. В стандарте IEEE 802.11 процедура измерения канала включает два основных шага: передача точкой доступа пилотного сигнала и сбор информации о состоянии канала (англ. channel state information, CSI) с принимающих станций. CSI отправляются в специальном кадре обратной связи (англ. compressed beamforming feedback, CBF). Из-за движения пользователей и окружающей среды состояние канала непрерывно меняется, и точке

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

доступа требуются регулярные обновления CSI. Такие обновления позволяют точке доступа поддерживать информацию о канале актуальной и, следовательно, рассчитывать эффективные прекодеры для передачи данных с наибольшей возможной скоростью. Однако процедура измерения, в особенности передача CBF, занимает большое время. В зависимости от масштаба сети длительность процедуры занимает от нескольких сотен микросекунд до нескольких миллисекунд [1], что может быть велико по сравнению с периодами процедуры прослушивания канала.

Для снижения накладных расходов можно снизить частоту измерения канала и уменьшить объем передаваемой информации о канале. При снижении частоты измерения проявляется *устаревание канала* (англ. channel aging). Оно связано с несоответствием между текущим и измеренным каналом из-за движения сетевых устройств и окружающих объектов. При сильном несоответствии текущего канала и построенного на измеренном канале прекодера MU-MIMO снижается мощность принимаемого сигнала и появляется межпользовательская интерференция, что приводит к снижению пропускной способности сети.

Второй подход с уменьшением объема CSI предполагает сжатие информации о канале с потерями. Дополнительно к этому возможно использовать прореживание CSI по подчастотам в канале. Объем кадра со сжатой информацией по сравнению с несжатой может различаться более чем в 4 раза. При этом объем потерь при сжатии определяет точность CSI на точке доступа, а следовательно и точность прекодера MU-MIMO [2].

Работы в литературе подробно изучают эти подходы по отдельности. Однако в практических сценариях с большим количеством антенн на точке доступа и большим числом устройств недостаточно использовать только один подход. В данной работе экспериментально исследуется влияние сжатия CSI в условиях временной эволюции на эффективность MU-MIMO. Для получения результатов была собрана установка с использованием программно-определяемых радиостанций, с помощью которой в различных сценариях были получены записи каналов. На основе этих записей сделана модель для оценки SINR MU-MIMO передач в рассматриваемых сценариях. Для анализа полученных результатов вводятся метрики, характеризующие время актуальности прекодера MU-MIMO. Кроме того, исследуются границы применимости модели TGax канала MU-MIMO в среде WLAN Toolbox. Для этого, с помощью разработанной модели передачи данных, проводится сравнение данных, полученных экспериментально и сгенерированных с помощью модели TGax. По результатам этого сравнения делается вывод о применимости упомянутой имитационной модели для воспроизведения и анализа сценариев, реализованных в экспериментальной части работы.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 проведен обзор литературы. В разделе 3 описан используемый принцип построения прекодера на основе сжатой информации о канале. В разделе 4 описана установка, проведение эксперимента и обработка экспериментальных данных. Раздел 5 посвящен численным результатам. В разделе 6 представлены выводы работы.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Исследованию методов сокращения накладных расходов MU-MIMO посвящено большое количество работ. Множество способов сжатия CSI при использовании MIMO перечислено, например, в работе [4]. Дополнительно к этому последние работы все больше рассматривают применение нейросетей в качестве инструмента для сжатия CSI. Авторы [5] смогли уменьшить погрешность при сжатии на 0,5–2,9 дБ при том же объеме данных по сравнению с аналогами, однако результаты получены в условиях сотовых сетей, где используется отличный от сетей Wi-Fi механизм сбора канальной информации. Кроме того, число пространственных потоков (англ. spatial streams) ограничено одним на клиента. В исследовании [6] авторы используют

такой же метод сжатия CSI как и авторы [5], но добавляют возможность переиспользовать информацию из предыдущих кадров CBF, что повышает эффективность сжатия. Перечисленные работы сфокусированы на анализе новых механизмов сжатия для сотовых сетей, что лишь косвенно применимо при работе над улучшением отличающихся механизмов сжатия, специфицированных в IEEE 802.11. Кроме того, в этих работах не рассматривается устаревание канала со временем как фактор ухудшения качества прекодера MU-MIMO.

Существует группа работ, в которых, напротив, детально исследуют устаревание канала и оптимизируют промежутки между измерениями канала. В работе [7] предложена аналитическая оценка достижимой пропускной способности в условиях устаревания канала вследствие доплеровского сдвига для произвольного количества антенн на точке доступа и станциях. Авторы работы [8] отмечают, что в стационарном случае фазовый шум гетеродинов влияет на мощность принимаемого сигнала больше, чем устаревание канала. В работе [3] с помощью имитационного моделирования показано, что для небольшого количества антенн на точке доступа использование более частого измерения канала увеличивает пропускную способность сети. Авторы статьи [9] исследуют подходы к ускорению модели канала 3GPP TR 38.901 без существенного влияния на поведение канала. Было показано, что уменьшение числа путей распространения сигнала может быть уменьшено для ускорения расчетов и без ущерба для свойств канала. Важность правильного моделирования, например для исследования эффективности алгоритмов предсказания канала методами машинного обучения, подчеркнута в статье [10]. В работах из этой группы рассматривается устаревание канала как в сотовых сетях, так и в сетях IEEE 802.11, однако ни в одной из работ не рассматривается влияние сжатия CSI на производительность MU-MIMO.

Одновременное рассмотрение сжатия CSI и устаревания канала присутствует лишь в нескольких работах. Авторы статьи [11] исследуют соотношение между степенью сжатия CSI и итоговой пропускной способностью. Авторы фокусируются на потере информации при сжатии и предлагают алгоритм адаптации степени сжатия для увеличения пропускной способности, а так же исследуют эффективность его работы в сценариях с изменяющимся каналом. Тем не менее, в этих работах зафиксирован период измерения канала, соответственно, влияние различной периодичности обновления CSI не изучено. Авторы работы [12] рассматривают подходы совместно и предлагают новый механизм передачи информации о канале. Для уменьшения накладных расходов предлагается сократить количество отправок полной информации о канале, а между ними отправлять разницу с предыдущим измерением канала. Эффективность механизма демонстрируется в условиях устаревания канала и при использовании сжатия CSI. Однако в работе исследована лишь одна конфигурация MU-MIMO, где у точки доступа 4 антенны и 1 антенна у каждого пользователя. В работе [13] проводится сравнение эффективности механизмов явной и неявной передачи информации о MIMO-канале в сетях Wi-Fi при разной точности CSI и периоде его обновления. Проведя имитационное моделирование обоих механизмов, авторы показывают, что использование неявной передачи информации имеет преимущества для повышения средней пропускной способности сети. Однако, этот механизм требует отдельных процедур для калибровки, а также существенных изменений в стандарте 802.11.

Таким образом, в большинстве работ сжатие CSI и устаревание канала рассматриваются отдельно, причем преимущественно в условиях сотовых сетей. В небольшом количестве работ, где авторы рассматривают сжатие CSI и устаревание канала одновременно в сетях IEEE 802.11, исследования проводятся с помощью имитационных моделей для ограниченного числа конфигураций MU-MIMO. Существующие исследования не содержат достаточного количества информации для повышения пропускной способности передач в сетях IEEE 802.11 при использовании MU-MIMO со сжатием CSI в условиях устаревания канала. В данной работе ставится

задача исследовать совместное влияние устаревания канала и стандартного метода сжатия CSI на мощность пространственных потоков MIMO. В исследовании используются записи эволюции канала MU-MIMO, полученные в натурном эксперименте. Кроме того, проводится явное сравнение результатов эксперимента и модели канала из WLAN Toolbox.

3. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ О КАНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CBF

В работе рассматривается сеть IEEE 802.11, где точка доступа с N^{TX} антеннами отправляет данные K принимающим станциям в режиме MU-MIMO. Станция i имеет N_i^{RX} антенн, причем в рамках этого исследования $\sum_{i=1}^K N_i^{RX} \leq N^{TX}$. Точка доступа передает данные станции i , используя $N_i^{SS} \leq N_i^{RX}$ пространственных потоков. Для осуществления передачи формируется прекодер, для составления которого точке доступа требуется знать матрицы каналов H_i от каждой станции i . Каждый элемент матрицы, h_{jk} , отражает изменение сигнала, переданного k -ой антенной точки доступа и принятого j -ой антенной станции. Для получения матрицы канала точка доступа инициирует процедуру измерения канала и собирает кадры CBF.

3.1. Представление информации о канале CBF

Опишем подробнее содержимое кадров CBF, используемых в дополнении к стандарту IEEE 802.11ax для передачи CSI. Матрица H_i размера $N_i^{RX} \times N^{TX}$, полученная пользователем i во время измерения канала, представляется в виде ее сингулярного разложения:

$$H_i = U_i \cdot S_i \cdot V_i^H, \quad (1)$$

где S_i — это диагональная матрица размера $N_i^{RX} \times N_i^{RX}$ с неотрицательными сингулярными числами на главной диагонали, а матрицы U_i (размера $N_i^{RX} \times N_i^{RX}$) и V_i (размера $N_i^{RX} \times N^{TX}$) — это матрицы, состоящие из левых и правых сингулярных векторов соответственно; V_i^H — это сопряженно-транспонированная матрица к V_i .

В кадре CBF пользователь i передает сжатую версию матрицы V_i и матрицы S_i . Каждое сингулярное число S_i можно интерпретировать как амплитуду сигнала в соответствующем пространственном потоке. Поэтому S_i можно конвертировать в набор отношений сигнал-шум (англ. signal-to-noise ratio, SNR) на каждом потоке, которые записываются в CBF с точностью 0,25 дБ. Далее, поскольку столбцы V_i ортонормированные, ее можно представить с помощью углов ϕ , ψ и θ , как описано в [15]. Однако для построения прекодера достаточно матрицы, построенной по углам ϕ и ψ , без использования угла θ . Необходимые углы квантуются с интервалом $\frac{2\pi}{2^b}$, то есть с разрядностью b для $\phi \in [0, 2\pi]$ (обозначение b_ϕ) и $b - 2$ для $\psi \in [0, \frac{\pi}{2}]$ (обозначение b_ψ). Отметим, что в данном методе сжатия величина разрядности является одним из определяющих факторов объема CBF и точности передаваемой CSI. Согласно стандарту, дополнительно уменьшить объем CBF можно с помощью прореживания канальной информации по частотам, но в данной работе эта опция не исследуется.

3.2. Оценка матрицы канала из CBF

При передаче несжатой информации о канале предполагается, что при формировании прекодера известна общая матрица канала H , которая составлена из матриц каналов H_i отдельных пользователей:

$$H = [H_1^T H_2^T \dots H_K^T]^T.$$

В кадрах CBF не содержится информации, достаточной для восстановления исходной H_i . Для оценки H_i из содержимого CBF точка доступа осуществляет следующие действия. Из полученных квантованных SNR восстанавливается диагональная матрица \tilde{S}_i . Из углов вращения

восстанавливается матрица \tilde{V}_i . Оценка \tilde{H}_i матрицы H_i получается как

$$\tilde{H}_i = \tilde{S}_i \cdot \left(\tilde{V}_i \right)^H.$$

Несмотря на то, что информация о матрице U_i отсутствует, оценка \tilde{H}_i пригодна для построения прекодера [15].

4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

4.1. Описание эксперимента

Для проведения экспериментов разработана установка, состоящая из четырех программно-определяемых радио NI USRP 2954R, которые оборудованы двумя приемо-передающими трактами. Два USRP использовались в роли станций, а два других выполняли роль точки доступа с четырьмя антеннами. Для объединения двух USRP в единое устройство требуется синхронизация их тактовых часов и гетеродинов, для чего дополнительно использовался модуль NI OctoClock CDA-2990. Точка доступа регулярно отправляет кадры для измерения канала каждые 1,5 мс. Такие кадры содержат в себе преамбулу, по которой станции могут измерить и записать канал H_i . Для сценариев с передачей сжатой информации о канале использовался метод CBF со значениями разрядности, описанные в последней версии стандарта IEEE 802.11. Мощность передачи всех устройств равна 7 дБм, мощность шума порядка -90 дБм.

Рассмотрены стационарный сценарий со статичным и динамичным окружением и мобильный сценарий, где устройства двигались. Статическое окружение предполагает неподвижно работающих людей в условиях офиса, а в динамичном сценарии один человек двигался по комнате со скоростью ходьбы. В течении эксперимента в стационарном сценарии положение устройств зафиксировано, станции расположены на расстоянии 1 м от точки доступа. В мобильном сценарии станция расположена на расстоянии 2 м от точки доступа передвигалась на платформе со скоростью 4,5 см/с перпендикулярно направлению на точку доступа. Схематическое изображение сценариев приведено на рис. 1. Для упрощения эксперимента в мобильном сценарии вместо двух отдельных USRP использовалась одна USRP на передвижной платформе. В этом случае записи каналов для двух станций представлены двумя половинами записи одной движущейся USRP.

4.2. Вычисление SNR потоков

Из полученных записей каналов вычисляются SNR потоков. Для этого необходимо определить конфигурацию, то есть каких пользователей обслуживать и сколько потоков им выделить. Дадим обозначение конфигурации набору $\{N_i^{SS}\}$ количества пространственных потоков для каждого пользователя $N_i^{SS} \in [0, N_i^{RX}]$. При этом $N^{SS} = \sum_{i=1}^K N_i^{SS} \leq N^{TX}$. После выбора конфигурации точка доступа генерирует информационный вектор s длины N^{SS} , составленный из информационных векторов s_i для каждого пользователя. Для передачи сигнала формируется прекодер P с помощью алгоритма блочной диагонализации (англ. Block Diagonalization, BD), описанного в [14]. При построении прекодера на передатчике на каждый поток выделяется одинаковая мощность. В результате прекодирования информационного вектора получается вектор передаваемого сигнала $x = Ps$ длины N^{TX} . При прохождении сигнала через текущий канал \tilde{H}_i пользователь i получает принятый сигнал $y_i = \tilde{H}_i x + n_i$, где n_i — вектор гауссового шума для пользователя i . Для оценки \tilde{s}_i информационного вектора s_i пользователь i применяет линейный эквалайзер W_i , получая $\tilde{s}_i = W_i y_i$. Эквалайзер формируется во время приема сигнала на основе оценки эффективного канала $\tilde{H}_i = \tilde{H}_i P$ и рассчитывается по методу MMSE,

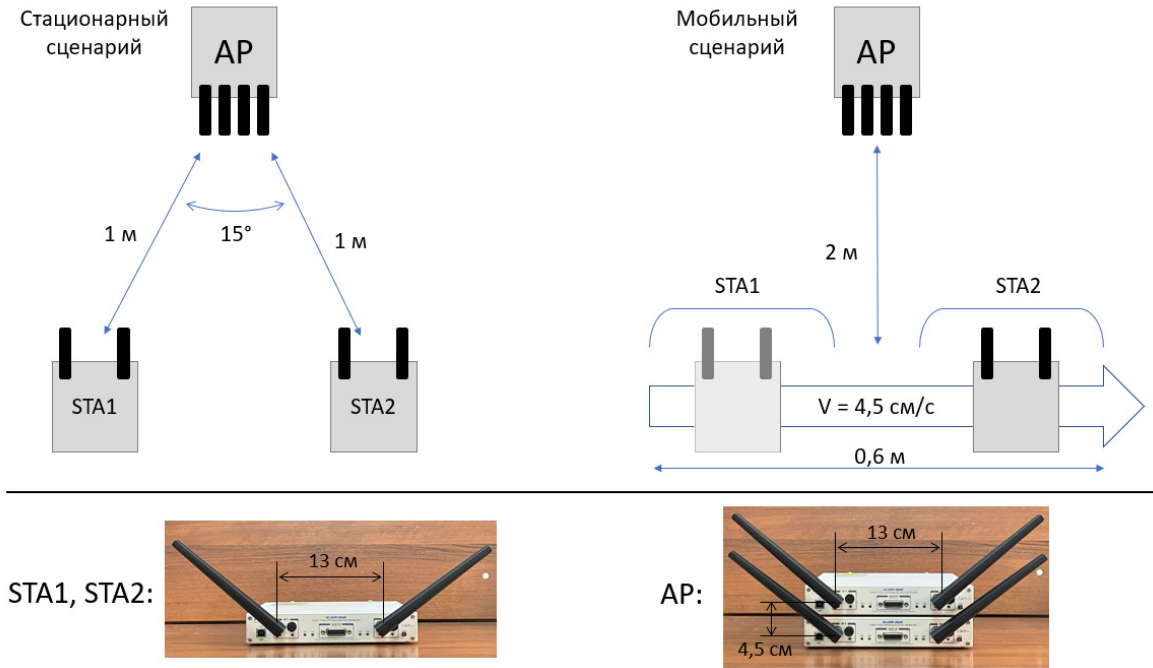


Рис. 1. Схема стационарного и мобильного сценария.

как описано, например, в [15]:

$$W_i = \tilde{H}_i^H \left(\tilde{H}_i \tilde{H}_i^H + \sigma^2 I \right)^{-1},$$

где σ^2 — дисперсия гауссового шума, I — единичная матрица. Считая, что элементы вектора s_i единичной мощности и независимы между собой и n_i , можно оценить матожидание J квадрата отклонения $e_i = \tilde{s}_i - s_i$:

$$J_i \equiv \mathbb{E}[e_i e_i^H] = W_i \left(\tilde{H}_i \tilde{H}_i^H + \sigma^2 I \right) W_i^H - W_i \tilde{H}_i - \left(W_i \tilde{H}_i \right)^H + I.$$

SNR $\gamma_{i,l}$ потока l пользователя i вычисляется как $\gamma_{i,l} = \frac{1-J_{i,ll}}{J_{i,ll}}$, где $J_{i,ll}$ — l -ый диагональный элемент матрицы J_i .

Описанным образом можно оценить SNR для каждого потока в течении всей записи канала. Для получения стабильных зависимостей SNR потоков от задержки применяется усреднение. SNR усредняются по 100 отрезкам длины 250 мс, с разными начальными моментами. Начала отрезков разнесены с интервалом 50 мс друг от друга.

4.3. Определения метрик

В работе анализируются зависимости SNR потоков от задержки между измерением канала и передачей данных с учетом сжатия CSI. Для наглядной интерпретации результатов вводятся две метрики: время жизни и время сходимости.

Время жизни потока — это максимальная задержка, при которой средний SNR потока отличается от SNR при нулевой задержке не более чем на 3 дБ. Эта разница между SNR выбрана как характерный интервал, превысив который потребуется обновление сигнально-кодовой конструкции (СКК).

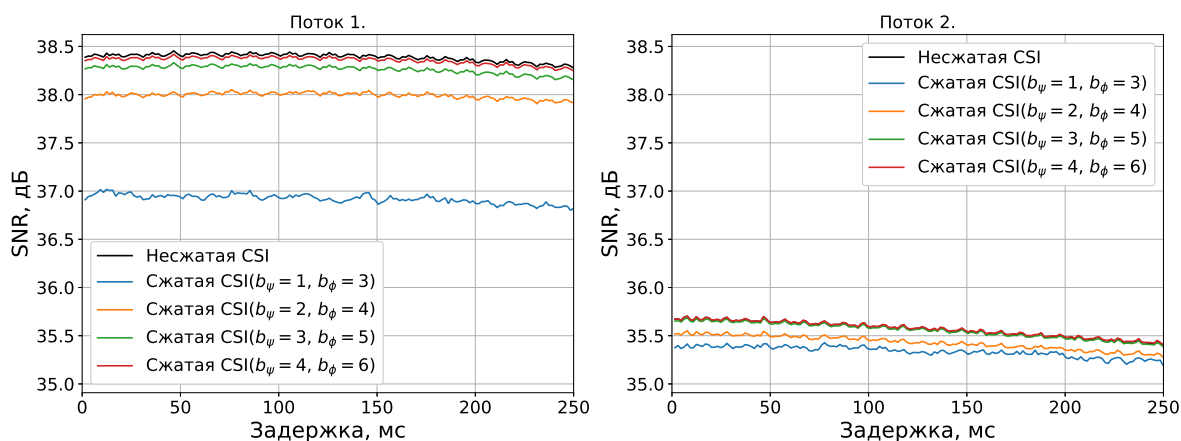


Рис. 2. Зависимость SNR от задержки в мобильном сценарии SU-MIMO.

На эффективность прекодера влияют сжатие CSI, по которой строится прекодер, и устаревание канала. Сжатие CSI снижает эффективность прекодера на начальном этапе, в момент создания прекодера, а за счет устаревания канала эффективность продолжает снижаться со временем. Разница в эффективности прекодеров в начальный момент времени, построенным по CSI с разной степенью сжатия, может нивелироваться со временем, то есть эффективности прекодеров сближаются. Чтобы отразить характерный временной промежуток от момента построения прекодера до такого сближения вводится *время сходимости* — минимальная задержка, при которой использование сжатия с выбранными параметрами обеспечивает средний SNR, отличающийся от среднего SNR без использования сжатия не более, чем на 1 дБ. Эта метрика отражает, обосновано ли использование выбранной степени сжатия CSI при фиксированном периоде измерения канала. При периодах меньших, чем время сходимости, снижение SNR из-за сжатия может быть велико, и при сжатии с большей точностью возможно увеличить SNR и повысить порядок СКК. При периодах больших, чем время сходимости, точность сжатия можно сохранить или даже уменьшить, при условии, что это не приведет к сильному падению SNR и понижению порядка СКК.

5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе приведен анализ записей канала. В частности, подраздел 5.1 посвящен анализу результатов, полученных в ходе натурных экспериментов с использованием USRP. Затем, в подразделе 5.2 приводится качественное сравнение с данными, полученными с помощью модели TGax канала MU-MIMO в среде WLAN Toolbox.

В работе будут рассмотрены две конфигурации MIMO-передат: однопользовательская (англ.: single user, SU) MIMO-передатча 4×2 с двумя потоками на пользователя и многопользовательская (англ.: multi-user, MU) MIMO-передатча 4×4 с двумя потоками на каждого пользователя. Далее для краткости указанные конфигурации обозначаются как SU-MIMO и MU-MIMO соответственно.

5.1. Анализ данных из натурных экспериментов

На рис. 2 приведена зависимость SNR от задержки в сценарии SU-MIMO с мобильным пользователем. Для SU-MIMO наблюдается очень малое влияние устаревания канала на SNR обоих потоков несмотря на мобильность пользователя. В частности, снижение SNR не превосходит 1,5 дБ в течение 250 мс для обоих потоков. Более того, качественный вид зависимости

SNR от задержки совпадает для прекодеров, построенных с использованием сжатой и несжатой информации о канале, и не зависит от потока.

Рассмотрим подробнее зависимость SNR для потока 1 при различных стандартных параметрах сжатия. SNR для параметров $(b_\psi = 4, b_\phi = 6)$ и $(b_\psi = 3, b_\phi = 5)$ практически не отличается от SNR для несжатого случая. Сжатие $(b_\psi = 2, b_\phi = 4)$ на всем отрезке задержек приводит к снижению на 0,5 дБ, а наиболее сильное сжатие $(b_\psi = 1, b_\phi = 3)$ — к снижению на 1,5 дБ, что больше, чем в случае остальных вариантов сжатия, но все еще не приводит к изменению СКК. Для потока 2 разница SNR между различными вариантами сжатия не превышает 0,5 дБ.

Случай стационарных устройств в сценарии SU-MIMO на графиках не приведен, так как влияние параметров сжатия аналогичное случаю мобильных устройств. При этом заметного падения SNR в течение 250 мс не наблюдается даже при динамическом окружении. Это можно объяснить значительно большей мощностью постоянного основного луча прямой видимости по сравнению с мощностью меняющихся отраженных лучей.

Перейдем к рассмотрению сценариев MU-MIMO. Полученные результаты для обоих пользователей похожи, поэтому далее приведены зависимости только для первого пользователя. На рис. 3а и рис. 3б приведены зависимости отношения мощности сигнала к сумме мощностей межпользовательской интерференции и шума (англ.: signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) от задержки для обоих потоков в стационарном сценарии для интервалов задержки 0–25 мс и 0–250 мс.

Для всех рассмотренных сценариев время жизни прекодера составляет менее 10 мс, что означает достаточно быстрое устаревание канала и, следовательно, необходимость понижения порядка СКК. При этом в стационарном сценарии значение SINR для обоих потоков быстро падает до некоторого постоянного значения, которое затем почти не уменьшается на протяжении 250 мс. Это объясняется следующим. Как и в случае SU-MIMO, в стационарном сценарии MU-MIMO луч прямой видимости не меняется, а динамическое окружение приводит только к небольшим колебаниям SINR. Быстрое устаревание канала в начале, отсутствующее в сценарии SU-MIMO, связано с появлением межпользовательской интерференции, возникшей в силу изменения канала.

Это наблюдение позволяет сформировать гипотезу о том, что в стационарном сценарии при формировании прекодера для передачи MU-MIMO стоит опираться именно на состояние канала луча прямой видимости вместо полного канала. Тогда, поскольку прекодер не основывается на быстро меняющихся компонентах канала, можно будет снизить среднюю мощность межпользовательской интерференции даже при редких процедурах измерения канала. Оценка эффективности такого подхода является предметом дальнейших исследований, выходящих за рамки данной работы.

Время сходимости в стационарном сценарии также мало, то есть оба варианта сжатия незначительно ухудшают производительность системы MU-MIMO по сравнению со случаем точной информации о канале. Таким образом, в сценарии со стационарными устройствами можно использовать менее точное квантование без потери производительности сети. В частности, из рис. 3б видно, что после 100 мс эффективность прекодера мало меняется в течение 250 мс. Если изначально выбрать СКК, для которой установившийся уровень SINR достаточен, то прекодер с периодом обновления более 100 мс можно использовать даже спустя 250 мс без падения SINR. При необходимости же частого обновления прекодера требуется самая высокая точность. В противном случае, при использовании более грубого квантования, наблюдается снижение SINR на величину до 4 дБ. Более того, частые и точные измерения CSI приводят к большим протокольным накладным расходам.

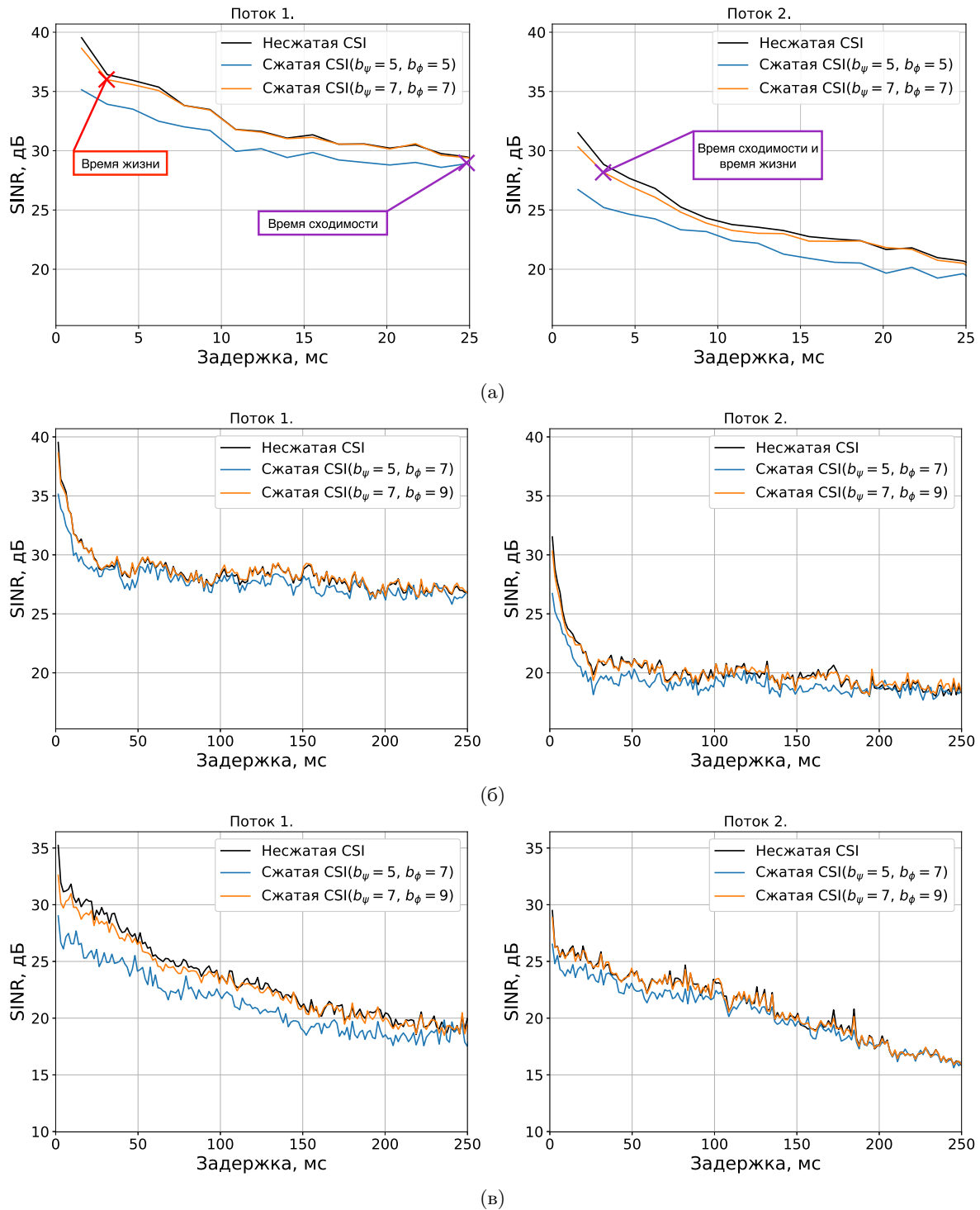


Рис. 3. Зависимость SINR от задержки для первого пользователя в сценарии MU-MIMO: (а) стационарный сценарий, интервал 0–25 мс, (б) стационарный сценарий, интервал 0–250 мс, (в) мобильный сценарий.

В случае мобильных пользователей зависимость SINR от задержки имеет существенно иной вид, см. рис. 3в. Движение устройств приводит к изменению луча прямой видимости, что выражается заметным падением SINR на всем участке измерения. Это говорит о том, что для поддержки большего выбранного уровня SINR в течении 250 мс или менее потребуется про-

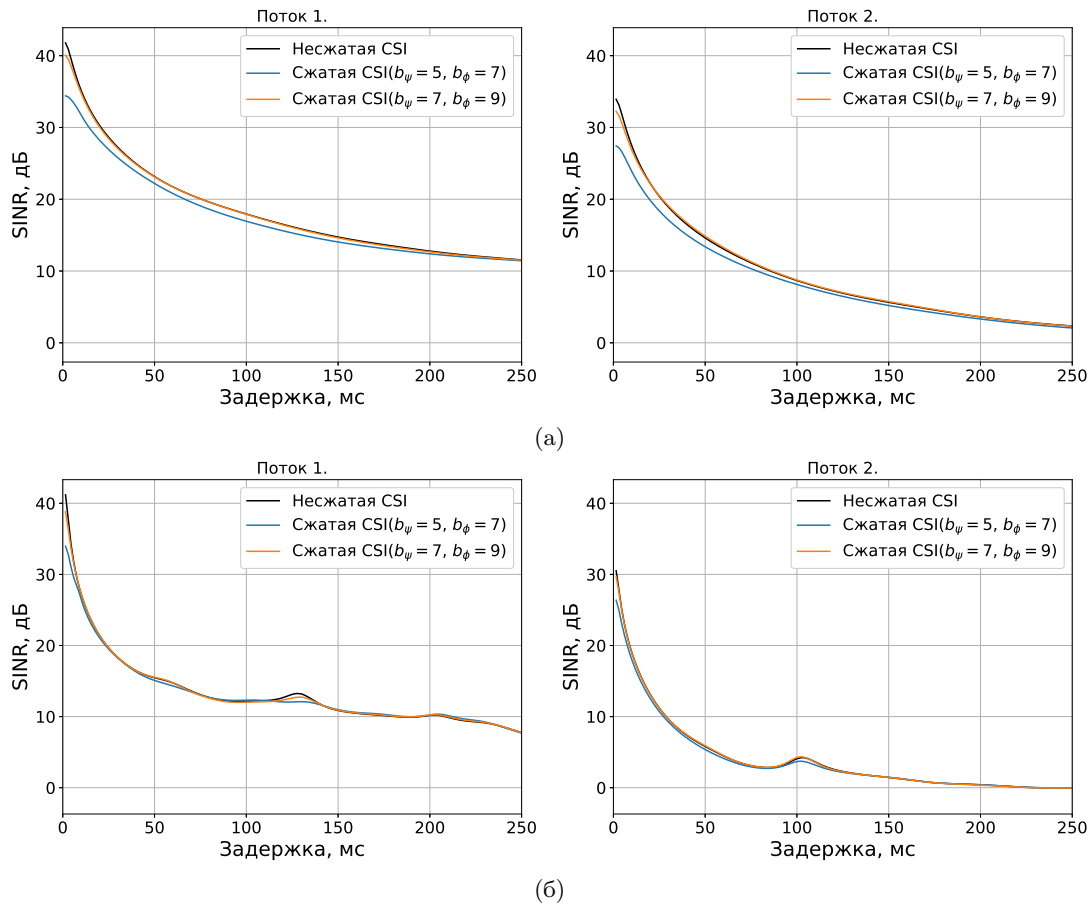


Рис. 4. Зависимость SINR от задержки для первого пользователя в сценариях MU-MIMO, WLAN Toolbox, калибровка мощности по стационарному сценарию. Скорость окружения: (а) 0,089 км/ч, (б) 0,267 км/ч.

порционально большая частота обновления CSI. Более того, увеличилось время сходимости, особенно для потока 1. Отсюда следует, что в мобильном сценарии точное квантование более актуально, чем в стационарном.

5.2. Анализ данных из модели канала TGax в среде WLAN Toolbox

Сравним экспериментальные результаты в стационарном сценарии с результатами, полученными с использованием модели канала TGax в среде WLAN Toolbox. В частности, использовался профиль задержки Model-B [16], соответствующий небольшому офисному помещению для случая существования луча прямой видимости между устройствами. Для удобства сравнения была проведена калибровка записей каналов из среды WLAN Toolbox: начальная мощность потоков и шума подобрана равной экспериментальным результатам стационарного сценария.

На рис. 4 приведены зависимости SINR от задержки для обоих потоков, полученные на каналах WLAN Toolbox, для разных скоростей окружения. Характер полученных зависимостей заметно отличается от того, что наблюдалось на экспериментальных данных в стационарном сценарии. При использовании данных из среды WLAN Toolbox SINR заметно падает в течение всего времени измерений, а скорость отражателей влияет только на скорость этого спада. Более того, в отличие от экспериментальных данных, падение происходит на 20 дБ и боль-

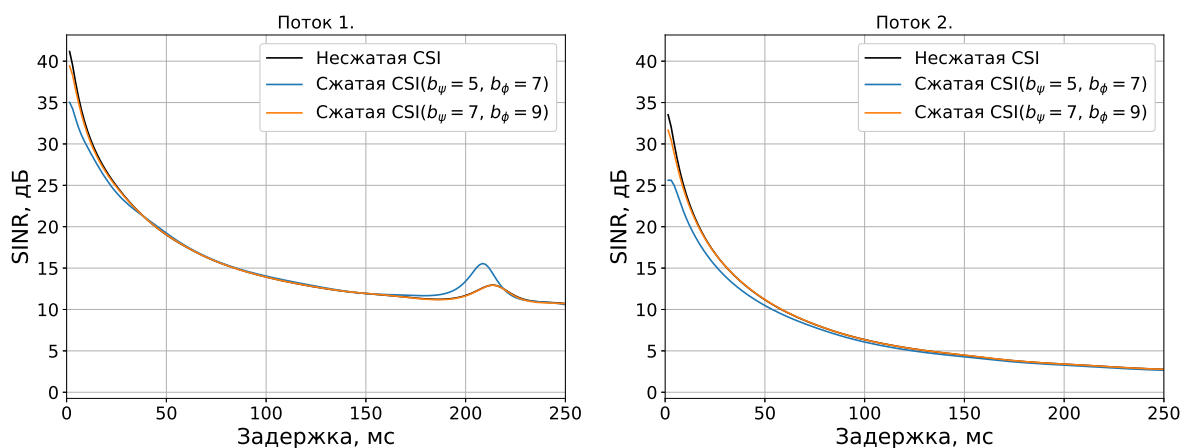


Рис. 5. Зависимость SINR от задержки первого пользователя в сценарии MU-MIMO, WLAN Toolbox, калибровка по мобильному сценарию. Скорость окружения равна 0,162 км/ч.

ше, что приводит к серьезному понижению порядка используемых СКК, делая применение старого прекодера неэффективным.

Такое поведение объясняется тем, что в среде WLAN Toolbox для выбранного профиля задержки моделируется не только движение отражателей, но и устройств, что приводит к сильному изменению луча прямой видимости и быстрому устареванию канала. Тем временем в аналогичном натурном эксперименте изменяются только отраженные лучи, что практически не сказывается на основном луче из-за сильного различия в мощности, приводя к гораздо более медленному устареванию канала. В частности, на рис. 3б за 100 мс SINR потока 1 падает до 28 дБ, в том время как на рис. 4 SINR снижается до 18 или 13 дБ в зависимости от скорости окружения.

Далее, из рис. 4а видно, что время сходимости для прекодера с параметрами сжатия ($b_\psi = 5, b_\phi = 7$) заметно больше аналогичной величины в стационарном сценарии рис. 3а и составляет 120 мс для скорости окружения 0,089 км/ч. При этом отличие между случаями сжатой информации о канале с наибольшей точностью и отсутствием сжатия все также незначительно.

На рис. 5 приведена зависимость SINR от задержки для канала WLAN Toolbox, откалиброванного по мобильному сценарию, скорость окружения соответствует скорости устройств в натурном эксперименте. Зависимости на рис. 3в и рис. 5 имеют качественно одинаковый характер: вначале резкое падение, затем медленное снижение SINR. При этом время сходимости для прекодера, построенного с параметрами сжатия ($b_\psi = 5, b_\phi = 7$), в эксперименте и в среде WLAN Toolbox составляет 200 мс и 26 мс, соответственно.

Таким образом, среду WLAN Toolbox можно использовать для моделирования сценариев с движущимися устройствами. Однако в сценариях, в которых движутся только окружающие объекты, зависимость SINR имеет принципиально другую форму, которую невозможно воспроизвести с помощью модели канала TGaх в среде WLAN Toolbox.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование влияния метода сжатия CSI в сетях IEEE 802.11 на эффективность MU-MIMO в условиях устаревания канала. Для исследования проведена серия натурных экспериментов, в ходе которых были записаны каналы MU-MIMO в стационарных и мобильных сценариях.

В результате исследования подтверждено, что прекодеры SU-MIMO имеют большое время жизни, даже в мобильных сценариях. Для всех случаев MU-MIMO в случае сжатия CSI с максимальной разрядностью наблюдаются минимальные значения времени сходимости по сравнению с другими разрядностями сжатия. Также для всех случаев MU-MIMO значения SINR для максимальной разрядности отличаются от значений SINR для CSI без сжатия не более чем на 1 дБ. В стационарных сценариях время сходимости лежит в пределах 30 мс и этот момент времени делит зависимость SINR на две области. В первой области SINR быстро падает сразу после получения CSI. Во второй области наблюдается постоянное значение величины SINR.

В мобильных случаях при сжатии CSI с разрядностью ($b_\psi = 5, b_\phi = 7$) SINR снижается, по сравнению с отсутствием сжатия, более чем 1 дБ в течение до 100 мс после измерения канала. Таким образом, для эффективной работы MU-MIMO и при необходимости использования частого измерения канала для поддержания высоких значений SINR, например в первой области наблюдений стационарного случая, требуется разработка метода измерения канала с низкими накладными расходами.

Также в работе отмечена принципиальная разница зависимостей SINR потоков в стационарном и мобильном сценарии. На графиках для WLAN Toolbox в случае статического сценария MU-MIMO наблюдается падение SINR на всем участке; отсутствует резкое падение в первые 30 мс и последующий выход на постоянное значение, как в аналогичном экспериментальном сценарии. При этом в мобильном сценарии MU-MIMO зависимости SINR для имитации в WLAN Toolbox и для эксперимента по характеру аналогичны. Таким образом показано, что WLAN Toolbox способен моделировать эволюцию каналов именно для мобильных сценариев. Для стационарных сценариев моделирование эволюции канала не отражает характерных особенностей кривых, которые наблюдаются для экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schelstraete S., Latif I., Dash D., Wang H. Implicit sounding overhead analysis. Doc: IEEE 802.11-19/1268r0, 2019.
2. Khorov E., Levitsky I., Akyildiz I. F. Current status and directions of IEEE 802.11be, the future Wi-Fi 7 *IEEE ACCESS*, 2020, vol. 8, pp. 88664–88688.
3. Redieteb G., Cariou L., Christin P., Helard J.-F. PHY+ MAC channel sounding interval analysis for IEEE 802.11ac MU-MIMO. *2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2012, pp. 1054–1058.
4. Oteri K., Lou H., Wang X., Yang R., Levy J., Sun L. H. Feedback Overhead Reduction in 802.11be. Doc: IEEE 802.11-19/0391r0, 2019.
5. Cai Q., Dong C., Niu K. Attention model for massive MIMO CSI compression feedback and recovery. *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2019, pp. 1–5.
6. Li X., Wu H. Spatio-temporal representation with deep neural recurrent network in MIMO CSI feedback. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, vol. 9, no. 5, pp. 653–657.
7. Kong C., Zhong C., Papazafeiropoulos A. K., Matthaiou M., Zhang Z. Sum-Rate and Power Scaling of Massive MIMO Systems With Channel Aging. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, vol. 63, no. 12, pp. 4879–4893.
8. Papazafeiropoulos A. K. Impact of General Channel Aging Conditions on the Downlink Performance of Massive MIMO. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, vol. 66, no. 2, pp.1428–1442.
9. Endovitskiy E., Kureev A., Khorov E. Reducing computational complexity for the 3GPP TR 38.901 MIMO channel model *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, vol. 11, no. 6, pp. 1133–1136.

10. Glinskiy K., Krasilov A., Khorov E., Kureev A. Performance of ML-Based Channel Prediction Algorithms for URLLC: Channel Model Matters *2023 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2023, pp. 306-311.
11. Xie X., Zhang X., Sundaresan K. Adaptive Feedback Compression for MIMO Networks. *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing & Networking*, 2013, pp. 477–488.
12. Porat R., Ojard E., Jindal N., Fischer M., Erceg V. Improved MU-MIMO performance for future 802.11 systems using differential feedback. *2013 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, 2013, pp. 1–5.
13. Endovitskiy E. O., Klimakov A. V., Loginov V. A., Khorov E. M., Shmelkin D. A. Study of Implicit Sounding Feedback in Wi-Fi Networks. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2022, vol. 67, no. 2, pp. 233–240.
14. Zu K., de Lamare R. C., Haardt M. Generalized Design of Low-Complexity Block Diagonalization Type Precoding Algorithms for Multiuser MIMO Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, vol. 61, no. 10, pp. 4232–4242.
15. Perahia E. and Stacey R. *Next generation wireless LANs: 802.11 n and 802.11 ac*. Cambridge university press, 2013.
16. Matlab WLAN Toolbox, <https://www.mathworks.com/help/wlan/ref/wlantgaxchannel-system-object.html>, 2023

Study of CSI Compression Influence on MU-MIMO Efficiency Under Channel Aging

A.V. Barannikov, I.A. Levitsky, V.A. Loginov, A.Yu. Troegubov, E.M. Khorov

The Multi-User Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO) technology allows increasing the channel throughput. However, MU-MIMO efficiency is reduced by overhead induced by frequent channel sounding and transmission of channel feedback frames. This paper examines the problems of channel state information (CSI) compression in Wi-Fi networks using MU-MIMO with channel aging. The research aims to experimentally test the efficiency of MU-MIMO technology in real use cases, taking into account channel sounding procedures and CSI feedback transmission. Using an experimental setup, we record the channel to analyze its behavior and the evolution of the signal received power under different conditions. In addition, we explore the applicability limits of the TGax MU-MIMO channel model in the WLAN Toolbox by comparing it with the experimental results. The findings of this study are particularly useful in optimizing MU-MIMO performance under channel time evolution and CSI compression.

KEYWORDS: CSI, MU-MIMO, CSI compression, channel aging.