

Исследование механизма неявной передачи информации о канале в сетях Wi-Fi¹

Е.О. Ендовицкий^{*,**}, А.В. Климаков^{***}, В.А. Логинов^{*}, Е.М. Хоров^{*},
Д.А. Шмелькин^{***}

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

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

^{***} *Huawei Russian Research Institute, Москва*

Поступила в редколлегию 13.11.2022 г., Принята 13.12.2022 г.

Аннотация—В связи с ростом числа пользователей беспроводных сетей Wi-Fi становится актуальной задача повышения пропускной способности сети при большом количестве пользовательских устройств. Одним из подходов к увеличению пропускной способности сети является метод пространственного разделения в системах с несколькими антеннами (MIMO). Работа алгоритмов использования MIMO существенным образом опирается на информацию о канале. В данной работе проводится сравнение механизмов явной и неявной передачи информации о MIMO-канале в сетях Wi-Fi, а также анализируется точность измерений канала при использовании каждого механизма и накладные расходы. С помощью имитационного моделирования показано, что применение механизма неявной передачи информации о MIMO-канале может увеличить среднюю пропускную способность сети более чем на 40%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Wi-Fi, измерение канала, MIMO

DOI: 10.53921/18195822_2022_22_4_362

1. ВВЕДЕНИЕ

Появление новых приложений с каждым годом увеличивает требования пользователей к пропускной способности сетей Wi-Fi. Несмотря на разработку и исследование новых методов передачи данных, нацеленных на повышение спектральной эффективности сетей Wi-Fi, таких как OFDMA (англ.: Orthogonal Frequency Division Multiple Access, множественный доступ с ортогональным разделением по частоте) [1, 2] и NOMA (англ.: non-orthogonal multiple access, неортогональный множественный доступ) [3], существенный прирост производительности происходит за счет метода пространственного разделения в системах с несколькими антеннами MIMO (англ.: Multiple In Multiple Out) [4]. При помощи этого метода становится возможным при наличии нескольких антенн на точке доступа и нескольких антенн на пользовательских устройствах (совокупно или по отдельности) передавать данные в нескольких пространственных потоках. Стандарт 802.11n позволяет теоретически передавать до четырех пространственных потоков между одной парой устройств. Но уже в стандарте 802.11ac максимальное число пространственных потоков увеличено до восьми, а также введена поддержка многопользовательской MIMO-передачи.

Эффективность работы методов MIMO существенным образом зависит от информации о канале. Будем называть матрицей MIMO-канала матрицу, состоящую из комплексных коэф-

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00788, <https://rscf.ru/project/20-19-00788/>.

фициентов передачи электромагнитного сигнала между каждой парой приемной и передающих антенн на одной поднесущей, а полной информацией о канале — совокупность таких матриц для всех поднесущих, на которых ведется передача. Несколько поднесущих применяются в методе цифрового мультиплексирования OFDM (англ.: orthogonal frequency division multiplexing, мультиплексирование посредством ортогонального разделения частот), в котором информационные биты передаются в несколько потоков на ортогональных (относительно операции быстрого преобразования Фурье) поднесущих. В технологии Wi-Fi существуют два механизма передачи полной информации о канале: *явная передача* (англ.: explicit feedback) и *неявная передача* (англ.: implicit feedback). В случае, когда точка доступа отправляет данные пользовательским устройствам (далее будем называть их станциями, следуя терминологии IEEE 802.11), для настройки MIMO точке доступа требуется информация о канале между ней и станциями. В механизме явной передачи информации о MIMO-канале, этот канал измеряется станциями по специальному кадру, содержащему заранее известный сигнал и отправляемому точкой доступа. После измерения станции передают информацию о канале точке доступа. При использовании механизма неявной передачи аналогичные кадры отсылаются, наоборот, станциями на точку доступа, которая по этим кадрам оценивает MIMO-канал от станций до точки доступа. Передача информации о канале называется неявной, поскольку MIMO-канал от точки доступа до станций оценивается по обратному каналу, то есть, по MIMO-каналу от станций до точки доступа, при этом матрица MIMO-канала явным образом не передается.

При малом числе пространственных потоков механизм явной передачи информации о канале представляет из себя компромисс между накладными расходами и сложностью реализации, поэтому только он используется в актуальных версиях стандарта, а именно, в 802.11ac и 802.11ax. Интерес к механизму неявной передачи информации о канале вновь возник в процессе разработки нового стандарта Wi-Fi 802.11be [5], в котором максимальное число пространственных потоков планировалось увеличить до 16. Соответствующее увеличение размера матриц MIMO-канала существенно увеличит накладных расходов при использовании механизма явной передачи информации о канале, что, в свою очередь, не позволит часто проводить процедуру измерения канала, поэтому устаревание может сказаться на точности информации о канале и, как следствие, негативно повлиять на эффективность MIMO и снизить пропускную способность сети. На данный момент неявная передача рассматривается для включения в стандарт Wi-Fi 8 [6]. Кроме того, она будет необходим при построении систем с реконфигурируемыми интеллектуальными поверхностями [7].

Механизм неявной передачи информации о канале является перспективным с точки зрения уменьшения объема накладных расходов, поскольку в нем не предполагается пересылка информации об измеренном канале. Однако, пропускная способность Wi-Fi при его применении мало исследована в литературе, а имеющиеся работы имеют существенные недостатки. Работа [8] содержит только анализ объема накладных расходов механизма неявной передачи информации о канале в различных схемах измерения, а именно, сравниваются последовательный и одновременный варианты передачи станциями кадров измерения канала. В работе [9] не учитываются накладные расходы, устаревание информации о канале, а также не приводится сравнение с механизмом явной передачи информации о канале. В работе [10] рассчитывается вероятность ошибки приема кадра в зависимости от неточности измерения канала в механизмах явной и неявной передачи информации о канале, затем, отдельно рассматривается объем накладных расходов. Недостатками и ограничениями исследования [11] являются рассмотрение фиксированной MIMO-конфигурации, а также упрощенный расчет суммарной пропускной способности: данные передает только точка доступа станциям, и эта многопользовательская передача занимает все оставшееся после обновления информации о канале время.

Основным вкладом данной статьи является подробное сравнение механизмов явной и неявной передачи информации о канале, учитывающее устаревание канала, накладные расходы на пересылку информации о канале, ее искажения при измерении. В отличие от существующих работ [8–11], где результаты получены с помощью аналитической оценки накладных расходов и моделирования ММО-передачи на физическом уровне с помощью соответствующей модели ММО-канала, данное исследование проведено в среде имитационного моделирования ns-3, которая учитывает особенности как физического, так и канального уровней стандарта 802.11, в том числе особенности доступа к каналу, протокольные накладные расходы, а также работу планировщика ММО-передач.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. Раздел 2 содержит подробное описание механизмов передачи информации о канале. Раздел 3 содержит описание особенностей моделирования вносимых механизмами искажений в информацию о канале, а также обзор существующих сравнений двух механизмов передачи информации о канале. Раздел 4 содержит описание сценария и результаты имитационного моделирования передачи данных в сетях Wi-Fi с использованием этих механизмов. Наконец, в разделе 5 приведены основные выводы.

2. ИЗМЕРЕНИЕ КАНАЛА В СЕТЯХ WI-FI

2.1. Измерение канала

Рассмотрим более подробно, как устроена процедура измерения канала в сетях Wi-Fi при приеме кадра. Оценка канала выполняется с помощью поля LTF (англ.: Long Training Field, поле длинного калибровочного сигнала) преамбулы кадра. В случае, когда на передатчике установлено несколько антенн, это поле содержит несколько калибровочных последовательностей, которые передаются с каждой из антенн устройства с фиксированным в стандарте циклическим сдвигом. Число последовательностей определяется числом пространственных потоков в текущей передаче. LTF используется при приеме ММО-передачи для измерения эффективного канала и настройки параметров приема пространственных потоков с данными.

В отличие от ММО-передачи в случае применения механизмов измерения канала для последующей настройки ММО число передаваемых полей LTF определяется числом антенн на передатчике, а не числом пространственных потоков. Другое отличие состоит в том, что для измерения канала с целью последующей настройки ММО одна из станций отправляет специальный кадр NDP (англ.: Null Data Packet, кадр без данных). Поле данных этого кадра пусто для снижения объема накладных расходов, а преамбула позволяет оценить полную матрицу канала.

Стандарт Wi-Fi определяет два основных механизма передачи информации о канале: *явная передача* и *неявная передача*. Эти механизмы различают по тому, какая станция отправляет кадр измерения канала. Рассмотрим каждый из них более подробно.

2.2. Механизм явной передачи информации о канале

В механизме явной передачи информации о канале точка доступа отправляет кадр для измерения канала, после чего станция вычисляет матрицу канала от точки доступа к станции. Эта информация нужна точке доступа для настройки параметров ММО-передачи, поэтому станция пересылает эту информацию точке доступа в одном из трех определенных стандартом форматов: полная матрица канала, матрица правых сингулярных векторов (для этого проводится сингулярное разложение матрицы канала), сжатая матрица правых сингулярных векторов.

Ввиду наименьшего объема накладных расходов, на практике наиболее часто применяется сжатая матрица правых сингулярных векторов. Для сжатия используется разложение мат-

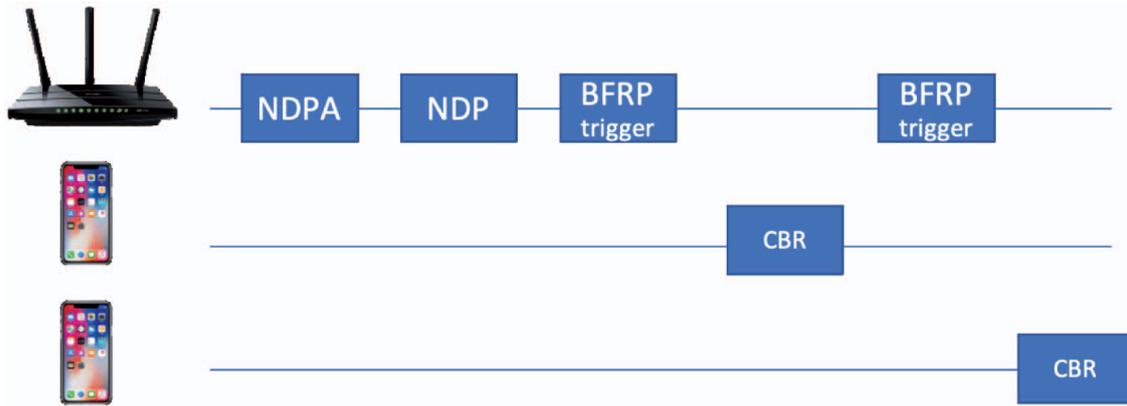


Рис. 1. Механизм явной передачи информации о канале.

рицы в произведение матриц, соответствующих поворотам Гивенса, с последующей передачей квантованных углов этих поворотов [12]. Так как канал на соседних поднесущих обычно бывает похож, для уменьшения накладных расходов информация о канале группируется по нескольким поднесущим, то есть отправляется не весь набор матриц для всех поднесущих, а по одной матрице на группу. Также отсылаются квантованные измерения сингулярных чисел, необходимые для пространственного разделения потоков в многопользовательской конфигурации. Сингулярные числа соответствуют отношению мощностей пространственных потоков [12]. Более конкретно, передается среднее отношение мощности сигнала к шуму по всем поднесущим, а также разница между этим средним и отношением на группах поднесущих [13]. Хотя группировка помогает уменьшить накладные расходы, она также приводит к снижению точности информации о частотно-избирательном канале.

Рассмотрим более подробно обмен кадрами при явной передаче информации о канале, см. рис. 1. В начале процедуры точка доступа посылает кадр NDPA, в котором сообщает параметры явной передачи информации о канале такие, как: размер группы поднесущих, разрядность квантования углов поворотов Гивенса и другие. Потом точка доступа передает кадр NDP, по которому станции могут оценить канал. После этого, точка доступа посылает каждой станции кадр BFRP trigger, в котором содержится запрос матриц канала у данной станции. Получив такой запрос, станция отправляет кадр CBR, содержащий в сжатой форме измерения матрицы канала.

2.3. Механизм неявной передачи информации о канале

Рассмотрим обмен кадров в механизме неявной передачи информации о канале, см. рис. 2. В нем NDP-кадр отправляет станция, после получения специального кадра-триггера (NDP trigger) от точки доступа. Точка доступа принимает NDP-кадр и по его преамбуле оценивает матрицу канала. Так как именно точка доступа будет вести MIMO-передачу, то пересылка информации о канале не требуется.

Особенностью механизма неявной передачи информации о канале является то, что в силу схемы измерения, для MIMO-передачи от точки доступа к станции используется информация об обратном канале. Известно, что эти каналы немного отличаются друг от друга в силу аппаратных несовершенств беспроводных устройств [14].

Для устранения этого эффекта применяются методы калибровки. Одними из самых популярных подходов в сетях Wi-Fi являются методы локальной калибровки. В этих методах калибровки требуемые поправки вычисляются на основе отношения канальных коэффициентов между парами антенн точки доступа, что отличает их от остальных методов, для которых

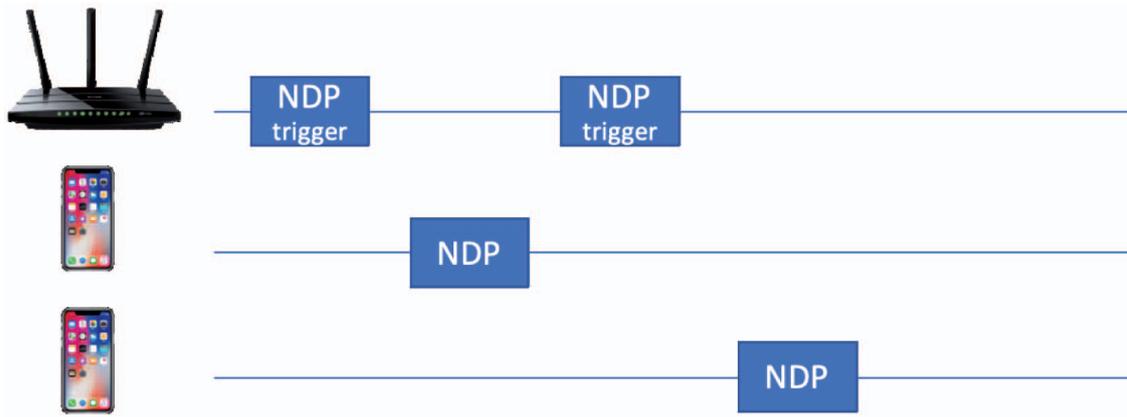


Рис. 2. Механизм неявной передачи информации о канале.

необходимы измерения канала в двух направлениях, а также последующая пересылка этой информации о канале от станции к точке доступа. В IEEE 802.11 предлагается использовать [9] такие алгоритмы локальной калибровки, как Argos [15] и LS [16].

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ О КАНАЛЕ

Исследованию механизма неявной передачи информации о канале в сетях Wi-Fi посвящен ряд работ. Часть работ рассматривают вопросы моделирования остаточной несимметричности каналов после калибровки. Наиболее часто применяемый [9, 10, 17–20] подход к моделированию остаточной несимметричности после калибровки состоит в том, что матрица нисходящего канала H_{dl} размера $N_r \times N_t$ и матрица восходящего канала H_{ul} размера $N_r \times N_t$ связаны соотношением:

$$H_{dl} = H_{ul}^T \Lambda, \quad (1)$$

где Λ — диагональная матрица. Элементы этой матрицы являются случайными комплексными числами, у которых фазы распределены равномерно, а амплитуды — лог-нормально.

В работе [21] исследовано относительное различие между матрицей канала в нисходящем канале и ее оценкой по матрице канала в восходящем канале с учетом работы алгоритмов калибровки. Авторы пришли к выводу о высокой точности локальной калибровки Argos, однако рассматривался только случай MIMO 2x1.

В исследовании [10] авторы сравнивают механизмы явной и неявной передачи информации о канале в сетях Wi-Fi при использовании многопользовательской MIMO-передачи. Они моделируют вносимые механизмами искажения информации о канале с помощью модели, задаваемой уравнением (1), а также рассчитывают накладные расходы. Основным недостатком работы является то, что влияние накладных расходов и влияние искажения измерений каналов на пропускную способность рассматриваются отдельно, хотя эти факторы взаимосвязаны. Например, при снижении накладных расходов не только получится передать больше полезных данных, но информация о канале в среднем будет более новой, то есть, будет меньше искажений, связанных с устареванием информации о канале.

Механизм неявной передачи информации о канале был убран из стандарта 802.11ac для упрощения реализаций MIMO в бытовой электронике [22, 23], но рассматривается его добавление в новый стандарт 802.11be [5].

Работа [11] является наиболее подробным сравнением механизмов явной и неявной передачи информации о канале в современных сетях Wi-Fi. В этой работе одновременно учитываются: искажения матриц вследствие оставшейся после калибровки несимметричности, устаревание

информации о канале, накладные расходы. Однако, в работе исследуется конфигурация ММО низкой размерности, а именно, у точки доступа четыре антенны и по одной антенны у станций, хотя современные устройства Wi-Fi зачастую имеют как минимум две антенны. Использование по одной антенне на станциях, с одной стороны, снижает разницу в объеме накладных расходов между механизмами явной и неявной передачи информации о канале, с другой — не позволяет учесть более сложные особенности ММО-передач: отправку нескольких пространственных потоков одному устройству и компенсацию неоптимальности настройки ММО-передачи на стороне приемника с несколькими антеннами в процессе обработки ММО-сигнала. Еще одним недостатком является то, что при передаче используется статическая ММО-конфигурация, на которой ведется передача весь оставшийся период между обновлениями информации о канале. На практике требуется рассматривать различные ММО-конфигурации, поскольку эффективность их использования зависит от канальных условий, и какая-то другая конфигурация может стать оптимальной с учетом устаревания канала. Также не учитываются протокольные особенности современных сетей Wi-Fi, такие как блочное подтверждение передачи (англ.: block ack) и ограничение длительности одной процедуры обмена информацией (англ.: TXOP limit). Последнее особенно важно, поскольку при некоторых конфигурациях ММО точка доступа может не успеть (особенно в варианте явной передачи) собрать данные со всех станций, из-за чего эффективный период обновления информации о канале может увеличиться. Указанные недостатки исправлены в исследовании, описанном в данной работе.

4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Описание сценария

Исследование механизмов передачи информации о канале проводится в среде имитационного моделирования ns-3. Для моделирования беспроводного канала используется модель TGax [24]. Точка доступа Wi-Fi передает насыщенный трафик восьми станциям. Станции расположены на одинаковом расстоянии от точки доступа. Все станции имеют по 4 антенны, а точка доступа имеет 8 антенн. Во время каждой передачи планировщик перебирает все возможные конфигурации (включая однопользовательские и многопользовательские) ММО и выбирает ту, которая обеспечивает наибольший прирост метрики PF (англ.: proportional fair) [25]. В конце имитационного моделирования эффективные пропускные способности соединений точки доступа и станций рассчитываются как отношение совокупного объема переданных данных к времени моделирования.

Для механизма явной передачи информации о канале используются следующие параметры. Чтобы учесть влияние сжатия матрицы при ее явной передаче, проводятся процедуры сжатия на основе матричного представления посредством поворотов Гивенса, квантования рассчитанных углов и, наконец, восстановления исходной матрицы. Измерения ММО-канала передаются с помощью СКК0 [10] или СКК2 [8], со следующими параметрами сжатия: для одной группы подчастот разрядность квантования углов поворотов Гивенса составляет 7+9 бит, а группа объединяет четыре поднесущие.

При моделировании остаточной несимметричности ММО-каналов в механизме неявной передачи информации о канале рассматриваются три случая. В первом случае канал является полностью симметричным, то есть матрица Λ является единичной, в дальнейшем этот случай обозначен как *неявная передача, точная информация*. Во втором случае моделирования остаточной несимметричности в случае неявного механизма измерения канала используется случайная модель, описанная подробно в разделе 3, соответственно, в дальнейшем обозначен как *неявная передача, неточная информация*. Амплитуда диагональных элементов распределена логнормально, со средним значением квадрата случайной величины 0 дБ и дисперсией σ , а фаза распределена равномерно в интервале $[-\theta_{max}, \theta_{max}]$.

В качестве значений параметров для модели ошибок были взяты следующие две пары. Значения $\sigma = 1$ дБ и $\theta_{max} = 1^\circ$ можно найти в работах, которые непосредственно используют описанную ранее модель остаточной несимметричности [10, 26]. Эти значения остаточной несимметричности в дальнейшем обозначается *больш.*. Следует отметить, что в этих работах значения параметров не посчитаны на основе экспериментальных измерений остаточной несимметричности после применения алгоритмов калибровки. Следовательно, неизвестно, насколько близко эти значения соответствуют реальным. Для устранения этого недостатка были рассмотрены работы [9, 15], в которых остаточная ошибка несимметричности была измерена на основе экспериментальных данных. Согласно результатам этих работ, можно выбрать следующие значения: $\sigma = 0.13$ дБ и $\theta_{max} = 3^\circ$, в дальнейшем обозначаемые как *мал.*. Остановимся подробнее на том, как они были вычислены. В отличие от максимального отклонения фазы θ_{max} , значение σ в работах не представлено, поскольку авторы не приближали полученные экспериментальные данные каким-либо распределением случайной величины. Произведем оценку σ в (дБ) логнормального распределения амплитуды по представленному в статье отклонению амплитуды в 1,4% (относительно среднего). Предположив, что это выборка из логнормальной случайной величины, применим формулу связывающую эти статистики между собой. После несложных преобразований можно получить, что тогда σ задается следующей формулой:

$$\sigma = \frac{\sqrt{-2 \ln(1 - \frac{0.014^2}{2})}}{20 \lg(e)}.$$

4.2. Влияние периода обновления информации о канале на среднюю пропускную способность

Среднее геометрическое эффективных пропускных способностей беспроводных соединений точки доступа и станций в зависимости от периода обновления информации о канале при механизмах явной и неявной передачи информации о канале изображено на рис. 3. В данном эксперименте все станции находятся на расстоянии 1 метра от точки доступа.

Неявная передача вносит существенно меньший по сравнению с явной передачей объем накладных расходов при измерении канала, что позволяет обновлять информацию о канале более часто. Частое обновление, в свою очередь, ослабляет влияние устаревания канала, что положительно сказывается на максимально достигаемом среднем геометрическом пропускных способностей. Действительно, если сравнить максимальные значения на кривых, соответствующих явной передаче информации о канале на СКК0 и неявной передаче информации о канале с учетом ее искажений, возникающих из-за остаточной несимметричности *малого* масштаба, можно заметить, что выигрыш составляет более 45%.

Использование СКК2 в случае явной передачи информации о канале повышает среднее геометрическое пропускных способностей, однако, максимальное значение все еще меньше, чем в случае неявной передачи с учетом искажений малого масштаба и без них. Можно заметить, что в обоих случаях, при СКК0 и СКК2, у кривых явной передачи отсутствует ярко выраженный локальный максимум и средняя пропускная способность растет с увеличением периода. Это значит, что для рассмотренных значений периода обновления информации о канале, если увеличить период, то снижение пропускной способности из-за устаревания будет меньше, чем соответствующее увеличение из-за снижения относительной доли накладных расходов на обновление информации о канале. Следовательно, накладные расходы в случае явной передачи имеют наибольший эффект на суммарную пропускную способность, если сравнивать этот эффект с неточностью информации о канале из-за устаревания.

Если остаточная несимметричность имеет большой масштаб, то преимущества механизма неявной передачи информации о канале полностью нивелируются неточностью информации о канале из-за этой несимметричности. В случае механизма неявной передачи с большим уров-

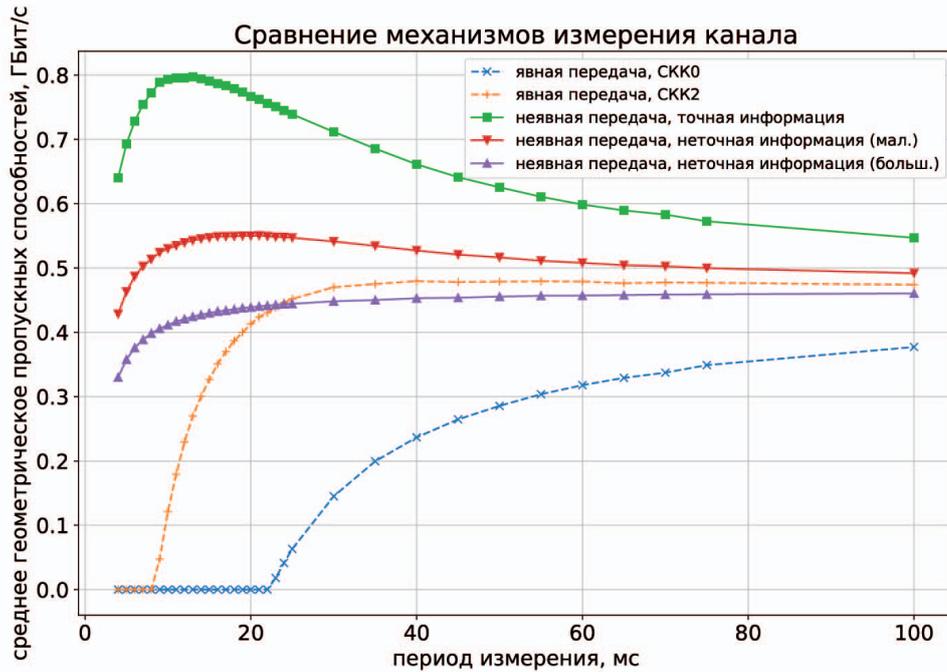


Рис. 3. Зависимость среднего геометрического пропускных способностей от периода измерения канала.

нем несимметричности средняя пропускная способность на 3% меньше, чем при явной передаче на СКК2 (рис. 3). Однако, как отмечалось ранее, масштаб этих ошибок не соответствует экспериментальным данным. Таким образом, при исследовании механизмов неявной передачи информации о канале с применением метода имитационного моделирования отдельное внимание следует уделить моделированию остаточной несимметричности.

4.3. Влияние удаленности от точки доступа на среднюю пропускную способность

Зависимость максимума среднего геометрического пропускных способностей от расстояния изображена на рис. 4. Максимальное значение рассчитано по значениям периода измерения канала от 0 до 100 мс для всех описанных ранее вариантов передачи информации о канале. Как можно заметить, наибольший относительный выигрыш неявной передачи с точной информацией относительно явной достигается при наименьшем расстоянии. В этом можно убедиться, сравнив, например, отношения значений на кривых *явная передача, СКК2* и *неявная передача, точная информация*. Полученную зависимость можно объяснить следующим образом: с уменьшением расстояния увеличивается отношение сигнала к шуму, поэтому влияние устаревания больше. Также из рис. 4 можно заметить, что остаточная после калибровки несимметричность значительно снижает потенциально достижимый выигрыш от использования неявной передачи информации о канале. В случае большого уровня остаточной несимметричности преимущество неявного метода в более низком объеме накладных расходов нивелируется вносимыми механизмом измерения искажениями в матрицу канала. Действительно, кривые *неявная передача, неточная информация (больш.)* и *явная передача, СКК2* близки почти при всех расстояниях.

Рассмотрим также влияние остаточной несимметричности в зависимости от расстояния. Можно отметить, что разница между методами *неявная передача, точная информация* и *неявная передача, неточная информация (мал.)* достигает примерно 44 % при расстоянии в 1 м.

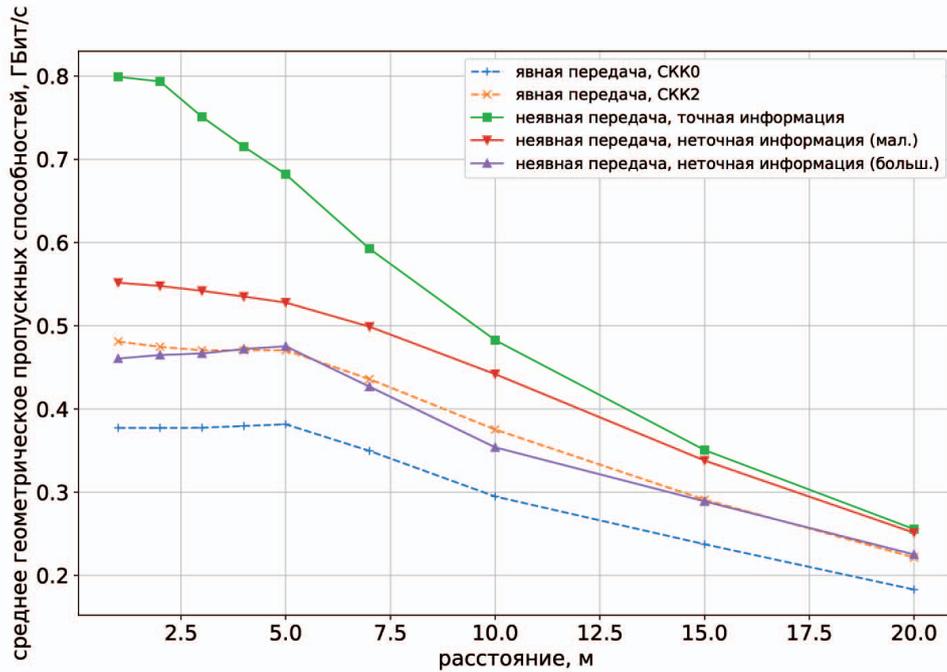


Рис. 4. Зависимость максимальной суммарной пропускной способности от расстояния до станций.

С увеличением расстояния, а, значит, с увеличением относительной мощности шума, эта относительная разница максимальных пропускных способностей уменьшается. Это происходит потому, что при малых отношениях мощности сигнала к шуму, шум в канале играет более значительную роль, чем неточности настройки ММО-передач из-за неточной информации о канале (из-за устаревания или из-за остаточной несимметричности).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе с помощью имитационного моделирования проведено сравнение механизмов явной и неявной передачи информации о ММО-канале в современных сетях Wi-Fi. В имитационном моделировании учтены такие аспекты, как накладные расходы обоих механизмов, влияние сжатия канальной информации в случае явной передачи, несимметричность каналов в случае неявной передачи, а также устаревание канальной информации и оптимальность различных конфигураций ММО. В результате показано, что использование механизма неявной передачи информации о канале позволяет существенно повысить среднее геометрическое пропускных способностей по сравнению с механизмом явной передачи информации о канале благодаря снижению длительности передачи информации о канале, а также использованию более актуальной информации. Показано, что масштаб остаточной несимметричности значительно влияет на выигрыш в средней пропускной способности в случае применения механизма неявной передачи информации о канале. Таким образом, при исследовании неявной передачи с помощью имитационного моделирования отдельное внимание следует уделить моделированию остаточной несимметричности, что является темой для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tutelian S., Bankov D., Shmelkin D., and Khorov E., IEEE 802.11 ax OFDMA Resource Allocation with Frequency-selective Fading, *Sensors*, vol. 21, no. 18, p. 6099, 2021.
2. Bankov D., Didenko A., Khorov E., Loginov V., Lyakhov A. IEEE 802.11ax uplink scheduler to minimize delay: A classic problem with new constraints. *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2017, pp. 1-5.
3. Endovitskiy E., Kureev A., Levitsky I., Tutelian S., and Khorov E., Performance Evaluation Of Downlink Non-orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks, *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 66, no. 12, pp. 1485–1490, 2021.
4. Khorov E., Kiryanov A., Lyakhov A., and Bianchi G., A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, 2019.
5. Khorov E., Levitsky I., and Akyildiz I. F., Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 88664–88688, 2020.
6. Eunsung J., et al., Beamforming Improvement for UHR, tech. rep., 2022.
7. Burtakov I., Kureev A., Tyarin A., Khorov E. QRIS: a QuaDRiGa-Based Simulation Platform for Reconfigurable Intelligent Surfaces, Submitted to *IEEE Access*, 2022
8. Schelstraete S., et al., Implicit Sounding Overhead Analysis, tech. rep., 2019.
9. Doostnejad R. et al., Implicit Channel Sounding in IEEE 802.11 (Feasibility Study), Tech. Rep. 802.11-19/0767r1, 2019.
10. Lou H., Ghosh M., Xia P., and Olesen R., A Comparison of Implicit and Explicit Channel Feedback Methods for MU-MIMO WLAN Systems, in *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 419–424, 2013.
11. Kedem O., et al., Implicit Sounding Performance, tech. rep., 2020.
12. Perahia E., and Stacey R., Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac. USA: Cambridge University Press, 2nd ed., 2013.
13. IEEE 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, *IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016)*, pp. 1–4379, 2021.
14. Zou Y., Raeesi O., Wichman R., Tolli A., and Valkama M., Analysis of Channel Non-reciprocity due to Transceiver and Antenna Coupling Mismatches in TDD Precoded Multi-user MIMO-OFDM downlink, in *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, pp. 1–7, 2014.
15. Shepard C., Yu H., Anand N., Li E., Marzetta T., Yang R., and Zhong L., Argos: Practical Many-antenna Base Stations, in *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Mobicom'12, (New York, NY, USA), pp. 53–64, Association for Computing Machinery, 2012.
16. Rogalin R., Bursalioglu O., Papadopoulos H., Caire G., and Molisch A., Hardware-impairment Compensation for Enabling Distributed Large-scale MIMO, in *2013 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, pp. 1–10, 2013.
17. Luo X., How Accurate Calibration is Needed in Massive MIMO?, in *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1–6, 2015.
18. Zhang W., Ren H., Pan C., Chen M., de Lamare R. C., Du B., and Dai J., Large-scale Antenna Systems with UL/DL Hardware Mismatch: Achievable Rates Analysis and Calibration, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 4, pp. 1216–1229, 2015.
19. Luo X., Multiuser Massive MIMO Performance with Calibration Errors, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 7, pp. 4521–4534, 2016.

20. A. Minasian, S. Shahbazpanahi, and R. S. Adve, Distributed Massive MIMO Systems with Non-reciprocal Channels: Impacts and Robust Beamforming, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 11, pp. 5261–5277, 2018.
21. Yunping Lv et al., Calibration of Implicit Sounding, Tech. Rep. 802.11-19/1193r0, 2019.
22. Gong M. X., Hart B., and Mao S., Advanced Wireless LAN technologies: IEEE 802.11 ac and beyond, *GetMobile: mobile computing and communications*, vol. 18, no. 4, pp. 48–52, 2015.
23. Perahia E. and Gong M. X., Gigabit Wireless LANs: an Overview of IEEE 802.11 ac and 802.11 ad, *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review*, vol. 15, no. 3, pp. 23–33, 2011.
24. Jianhan L., Ron P., et al., “TGAX Channel Model,” *IEEE 802. 11-14/0882r4*, 2014.
25. Dardouri S. and Bouallegue R., Comparative Study of Downlink Packet Scheduling for LTE Networks, *Wireless Personal Communications*, vol. 82, no. 3, pp. 1405–1418, 2015.
26. Wei H., Wang D., Zhu H., Wang J., Sun S., and You X., Mutual Coupling Calibration for Multiuser Massive MIMO systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 606–619, 2016.

A Study of Implicit Sounding Feedback in Wi-Fi Networks

E.O. Endovitskiy, A.V. Klimakov, V.A. Loginov, E.M. Khorov, D.A. Shmelkin

As the number of Wi-Fi network users is growing, a problem of increasing the network capacity in a scenario with many user devices becomes relevant. One of the approaches to increasing network capacity is MIMO. The performance of MIMO algorithms relies significantly on information about the channel. The paper compares the explicit and implicit sounding mechanisms in Wi-Fi networks. The paper discusses the accuracy of sounding when using each mechanism, as well as protocol overhead. With simulation, it is shown that the use of an implicit channel measurement mechanism increases the total network capacity by more than 40%.

KEYWORDS: Wi-Fi, channel sounding, MIMO.