

Исследование эффективности методов неявной оценки канала MU-MIMO в сетях Wi-Fi¹

А. А. Третьяков*,**, Е. О. Ендовицкий*,**, И. А. Левицкий*, В. А. Логинов*,
Е. М. Хоров*

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

** Московский независимый исследовательский институт искусственного интеллекта

Поступила в редакцию 30.08.2025 г. Принята 20.11.2025 г.

Аннотация—Механизм многопользовательских многоантенных передач (MU-MIMO) является важной частью современных сетей Wi-Fi, позволяя существенно повысить их производительность в сценариях с большим количеством устройств. Для его работы в сетях Wi-Fi текущего поколения используется процедура явной оценки канала, включающая длительную передачу информации о канале. Для сокращения накладных расходов рассматривается процедура неявной оценки канала. В работе реализован прототип устройства Wi-Fi на базе программно-определенного радио с поддержкой явной и двух методов неявной оценки канала: с последовательной и одновременной (мультиплексированной) передачей пилотных сигналов от станций. Второй метод имеет меньшую длительность процедуры, но в ходе экспериментов показано, что его использование приводит к снижению отношения сигнал-интерференция-плюс-шум во время оценки канала до 4 дБ по сравнению с последовательной передачей. Из-за ухудшения качества неявной оценки канала возникают ошибки при калибровке, и пропускная способность передач MU-MIMO снижается на 20–25% (без учета накладных расходов на оценку канала).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Wi-Fi 8, MU-MIMO, неявная оценка канала, калибровка для взаимных каналов.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_4_670

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день механизм многопользовательских многоантенных передач (англ.: multi-user multiple-input multiple-output, MU-MIMO) является неотъемлемой частью технологии Wi-Fi и одним из основных средств повышения пропускной способности беспроводных локальных сетей [1]. MU-MIMO позволяет точке доступа (англ.: access point, AP) одновременно обмениваться данными с несколькими станциями (англ.: station, STA) и тем самым существенно повысить производительность сети. Для работы этого механизма требуется проводить оценку канала (англ.: sounding). В текущих стандартах Wi-Fi для MU-MIMO используется явная оценка канала (англ.: explicit sounding), изображенная на рис. 1а, которая выполняется по следующей схеме: AP передает специальные кадры NDP (англ.: null data packet) с пилотными сигналами, по которым станции оценивают канал и отправляют эту оценку в кадрах CBR (англ.: compressed beamforming report). Проблема заключается в том, что накладные расходы на передачу массивных CBR-кадров быстро растут с увеличением числа пользователей, антенн и ширины канала [2, 3], что приводит к снижению пропускной способности.

Главной целью разрабатываемого стандарта IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8) является обеспечение сверхвысокой надежности [4, 5]. Одним из ключевых направлений является снижение накладных расходов на оценку канала [6, 7]. Возможным решением выступает неявная оценка канала

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00756

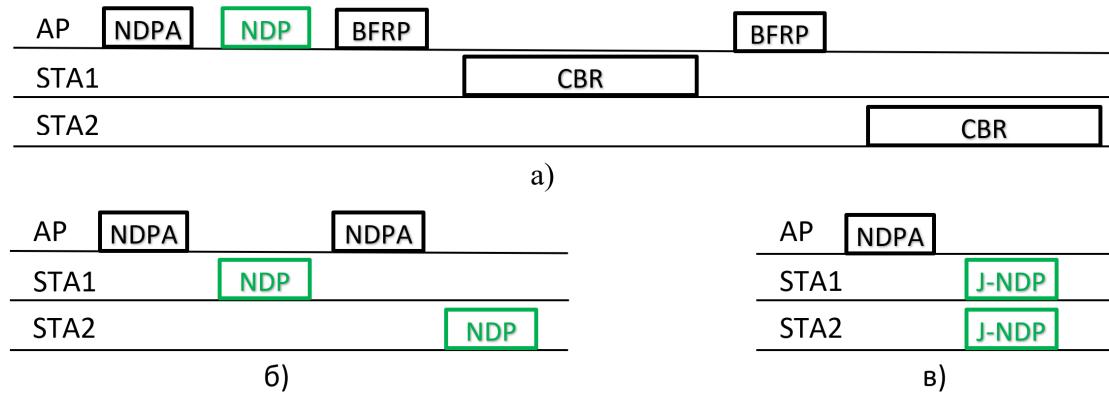


Рис. 1. Процедуры оценки канала: а) явная; б) неявная без мультиплексирования пилотных сигналов; в) неявная с мультиплексированием пилотных сигналов. Цветом выделены только те кадры, которые передаются в проводимых экспериментах.

(англ.: *implicit sounding*), изображенная на рис. 1б, при которой кадры NDP передают сами станции, а точка доступа проводит измерение и восстанавливает оценку канала, опираясь на взаимность (англ.: *channel reciprocity*) между восходящим и нисходящим каналами.

Дополнительно сократить длительность процедуры оценки канала можно, если несколько станций будут передавать пилотные сигналы одновременно (см. рис. 1в), то есть *мультиплексировать* их в виде совместного кадра Joint-NDP. В этом случае точка доступа должна разделить сигналы при приеме, поэтому пилотные сигналы должны быть ортогональны. На практике ортогональность нарушается из-за аппаратных особенностей: остаточного смещения несущей частоты, несовпадения временных отсчетов, различий амплитудно-фазовых характеристик передающих и приемных трактов, I/Q-асимметрии и других неидеальностей радиоинтерфейсов, что приводит к снижению качества получаемой оценки канала и неэффективности MU-MIMO-передачи.

Для повышения эффективности MU-MIMO в Wi-Fi возникает необходимость совместно учитывать накладные расходы на процедуру оценки канала и качество получаемой оценки. С одной стороны, неявная оценка канала и мультиплексирование пилотных сигналов позволяют существенно уменьшить длительность этой процедуры. С другой стороны, ухудшение качества оценки канала из-за нарушения взаимности и потери ортогональности пилотов может нивелировать выигрыш по эффективности.

Настоящая работа направлена на экспериментальное изучение и сравнение эффективности процедур оценки канала с использованием программно-определенного радио. В работе показано, что мультиплексирование пилотных сигналов приводит к худшей оценке и снижению пропускной способности на 20–25% (без учета накладных расходов на оценку канала).

Работа построена следующим образом. В разделе 2 содержится описание методов оценки канала в беспроводных сетях и обзор литературы. Раздел 3 описывает экспериментальную установку, сценарии и численные результаты. Раздел 4 содержит выводы к работе.

2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАНАЛА

В литературе, посвященной многоантенным системам в сетях Wi-Fi, выделяют два подхода для получения информации о состоянии канала: явная и неявная оценка. При явной оценке канала, применяемой в стандартах IEEE 802.11n/ac/ax/be, точка доступа передает кадр NDP с пилотными сигналами, а каждая станция оценивает канал и отправляет эту оценку в кадре CBR. Такой метод обеспечивает высокое качество оценки, поскольку каждая STA измеряет

свой нисходящий канал по пилотным сигналам AP высокой мощности, но накладные расходы на передачу CBR растут с увеличением числа пространственных потоков, поднесущих и пользователей [1, 2].

Проблема роста накладных расходов решается в основном за счет оптимизации длительности CBR различными способами сжатия информации о канале [1, 6] и адаптивного выбора периода оценки канала [3]. Тем не менее в такой процедуре все еще требуется явно передавать CBR от каждой STA к AP.

Альтернативой является неявная оценка канала, которая рассматривается как один из способов уменьшения накладных расходов в сетях IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8) [6, 8]. В этой схеме кадры NDP передают сами станции, а точка доступа оценивает восходящий канал и использует его взаимность для оценки нисходящего, то есть отдельные CBR-кадры не требуются. Однако взаимность между восходящим и нисходящим каналами может нарушаться из-за различий в характеристиках принимающего и передающего трактов на устройствах. Для компенсации этого несоответствия используется калибровка — установление взаимосвязи между нисходящим и восходящим каналами. К каждой оценке восходящего канала применяются калибровочные преобразования для получения информации о нисходящем канале.

Для внедрения в стандарт Wi-Fi рассматриваются два варианта неявной оценки канала: *последовательный*, когда станции передают NDP по очереди, и *мультиплексированный*, когда несколько STA передают совместный кадр Joint-NDP. Недостаток последовательной схемы в ее длительности: она линейно растет с числом STA и может быть неприемлемой в сценариях с большим числом пользователей или жесткими требованиями по задержке. Мультиплексированная оценка позволяет оценить каналы нескольких STA за один кадр. Она реализуется за счет ортогонального кодового разделения пилотных сигналов. Это существенно сокращает длительность процедуры оценки канала. Однако ее качество сильно зависит от аппаратных неидеальностей, например смещения несущей частоты или несовпадения временных отсчетов.

Ряд работ подробно сравнивает явную и неявную оценку канала для MU-MIMO в Wi-Fi. В [2] анализируются последовательности кадров, накладные расходы и доля потерянных пакетов при использовании явного и неявного метода оценки канала в системах, близких к IEEE 802.11ac. Показано, что неявная схема позволяет заметно уменьшить длительность процедуры оценки и увеличить пропускную способность, но только при достаточно точной калибровке и умеренном уровне аппаратных неидеальностей; в противном случае ухудшается отношение сигнал-интерференция-плюс-шум (англ.: signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) и возрастает вероятность ошибки. В работе [9] с помощью имитационного моделирования показано, что при идеализированной взаимности канала, отсутствии аппаратных искажений и точном учете разницы мощностей передатчиков неявная оценка канала может увеличить суммарную пропускную способность более чем на 40 % по сравнению с явной. При этом рассматриваются идеализированные модели каналов, не учитывается формат пилотных сигналов Wi-Fi и не рассматриваются конкретные алгоритмы калибровки.

Эффективность неявной оценки канала критически зависит от точности калибровки между передающим и принимающим трактами на каждой стороне. Если калибровочные коэффициенты оценены неточно, то остаточные ошибки калибровки приводят к неверному формированию лучей и межпользовательским помехам. Неявная оценка канала и калибровка давно стандартизованы и широко используются в системах сотовой связи (4G LTE и 5G NR), где преодоление в нисходящем канале строится на основе пилотных сигналов в восходящем канале. В этом контексте в работе [10] систематически разобраны источники нарушения взаимности канала: несогласованность трактов передатчик/приемник, взаимная связь антенн, нелинейности. Экспериментальная установка Argos [11] и последующие работы [12] демонстрируют, что корректная калибровка позволяет реализовать масштабируемые MU-MIMO-системы с боль-

шим числом антенн, однако эти результаты получены для сотовых сетей и не учитывают специфику форматов пилотных сигналов и кадров Wi-Fi.

Экспериментальные исследования эффективности неявной оценки канала в стандартах семейства IEEE 802.11 на данный момент немногочисленны. Одна из немногих таких работ [13] предлагает экспериментальный стенд с поддержкой неявной оценки канала MU-MIMO для стандарта IEEE 802.11af. Авторы показывают, что при корректной калибровке различия по пропускной способности и вероятности ошибки между явной и неявной схемой невелики, при этом временные накладные расходы на оценку канала уменьшаются. Однако используется модифицированный физический уровень и упрощенные сценарии, а влияние ошибок калибровки и аппаратных неидеальностей количественно не анализируется.

На основе этих экспериментальных исследований и аналитических моделей появились статьи, прямо оценивающие влияние ошибок калибровки на суммарную пропускную способность. Авторы [14] выводят требования к точности калибровки в massive MIMO, связывая дисперсию ошибок калибровочных коэффициентов с деградацией SINR и спектральной эффективности. В работе [15] анализируется влияние аппаратного несоответствия приемника и передатчика в системах massive MIMO, а в [16, 17] показано, что даже относительно небольшие остаточные ошибки калибровки могут существенно снизить выигрыш от MU-MIMO и требуют явного учета при реализации прекодирования. При этом все эти статьи рассматривают либо абстрактные TDD-системы, либо сотовые сети LTE/NR, где неявная оценка канала уже стандартизована, и не учитывают особенности оценки канала и форматов пилотных сигналов Wi-Fi.

В ряде работ предлагаются алгоритмы калибровки, включая методы, основанные на TLS (англ.: total least squares). В статье [18] предложена калибровка для системы massive MIMO, учитывающая взаимную связь между антеннами; авторы строят вероятностную модель ошибок калибровки и выводят выражения для суммарной пропускной способности от этих ошибок. Ранее в [19] было показано, что оценка калибровочных коэффициентов с помощью TLS позволяет лучше учитывать шум измерений и ошибки модели по сравнению с классическим методом наименьших квадратов, что делает TLS естественным кандидатом для калибровки в условиях ограниченного числа пилотных сигналов, подверженных помехам. Однако эти методы проектировались для сотовых сетей и не были адаптированы к структуре кадров Wi-Fi.

В рабочих документах группы IEEE 802.11 [20] исследуется реализуемость неявной оценки канала в сетях Wi-Fi, выделяются основные источники нарушения взаимности канала (различия передающих и приемных трактов, смещения частоты, ошибки синхронизации) и предлагаются варианты процедур калибровки, но без количественного анализа итоговой пропускной способности MU-MIMO. В документе [21] оцениваются накладные расходы на неявную оценку канала в различных вариантах MU-MIMO и показывается, как выигрыш по пропускной способности зависит от числа пользователей и периода обновления оценки канала. В совокупности эти работы подтверждают потенциал неявной оценки канала для снижения накладных расходов, но оставляют открытыми вопросы о влиянии аппаратных неидеальностей, точности калибровки и структуры пилотных сигналов на качество оценки канала и реальную пропускную способность в сетях Wi-Fi.

Таким образом, в литературе пока отсутствуют работы, которые экспериментально сравнивают последовательную и мультиплексированную передачу пилотных сигналов для неявной оценки канала в сетях Wi-Fi. В данной работе впервые реализована экспериментальная установка на базе программно-определяемых радио для сравнения схем явной и неявной оценки канала в Wi-Fi. С помощью установки проанализировано влияние мультиплексирования пилотных сигналов на качество оценки канала, точность TLS-калибровки и пропускную способность сети.



Рис. 2. Устройства, используемые в экспериментах: а) точка доступа, б) станция.

3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе проводится сравнение методов неявной оценки канала. Для экспериментов создан прототип устройства Wi-Fi с поддержкой нескольких процедур оценки канала на базе программно-определенного радио (ПОР) NI USRP-2954. ПОР использует модифицированное ПО NI LabVIEW 802.11 Application Framework, в котором добавлена поддержка оценки канала 4x4. Каждое устройство может принимать и отправлять кадры NDP, реализуя оценку канала в обоих направлениях. Два ПОР, объединенные с помощью устройства синхронизации NI CDA-2990, используются в качестве точки доступа (AP) с 4 антennами, и еще два используются как отдельные станции (STA1 и STA2) с 2 антennами каждая. Используемая ширина канала составляет 80 МГц. ПОР расположены в помещении в пределах прямой видимости. Рассматриваются два сценария: статический, в котором все объекты в комнате зафиксированы, и динамический, в котором в комнате с устройствами присутствует человек, что приводит к большей вариативности канала.

AP и STA периодически обмениваются кадрами NDP, проводя измерения канала в обоих направлениях. Одна сессия оценки канала состоит из последовательной отправки NDP от AP к STA и от STA к AP. Интервал между NDP внутри сессии составляет 1 мс. Сессии оценки проводятся каждые 3 мс. ПОР передают только кадры NDP, а измеренные оценки канала сохраняются на самих устройствах.

Явная и мультиплексированная неявная оценка канала осуществляются по пилотным сигналам, представленным четырьмя символами 1xUHR-LTF, а неявная последовательная оценка — по паре наборов из двух таких символов от каждой станции по отдельности. Явная оценка канала используется в качестве базовой процедуры для сравнения производительности.

В качестве метрики качества канала используется SINR. Он вычисляется как отношение средней амплитуды сигнала к ее среднеквадратичному отклонению за вычетом локального тренда канала на основе последних измерений (чтобы эволюция канала не оказывала влияние на SINR). На рис. 3 приведены графики разности SINR неявной оценки и явной оценки. В статическом и динамическом сценарии неявная оценка без мультиплексирования имеет SINR на 1–3 дБ ниже явной, что объясняется различной максимальной мощностью передачи разных ПОР. Для корректного учета этого эффекта и производится сравнение разности SINR (по сравнению с явной оценкой между теми же ПОР), а не их абсолютных значений.

Ключевым результатом является различие SINR между двумя видами неявной оценки канала: мультиплексирование приводит к дополнительному снижению SINR на 2–4 дБ. Поскольку

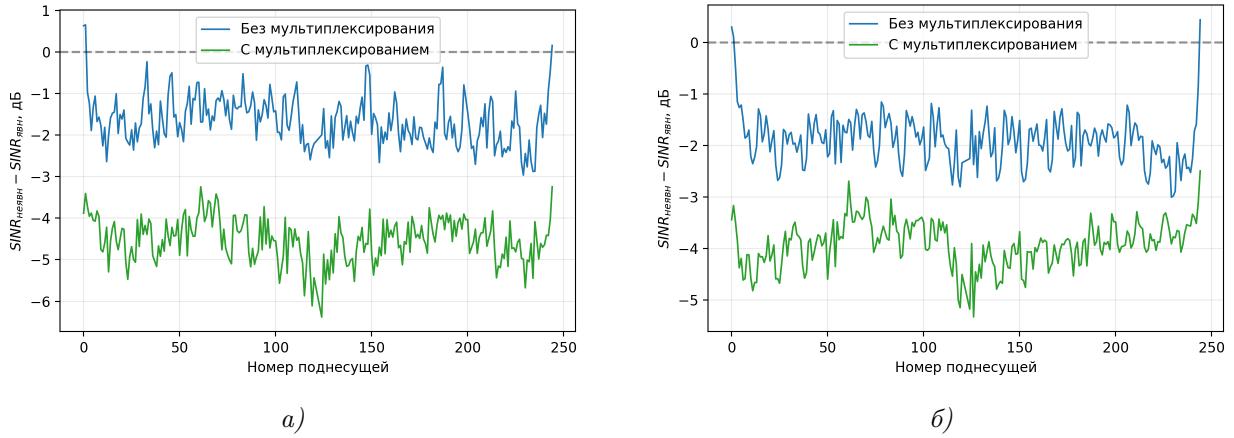


Рис. 3. Разность SINR между явной и неявной оценкой канала двух видов в зависимости от номера поднесущей в а) статическом и б) динамическом сценариях.

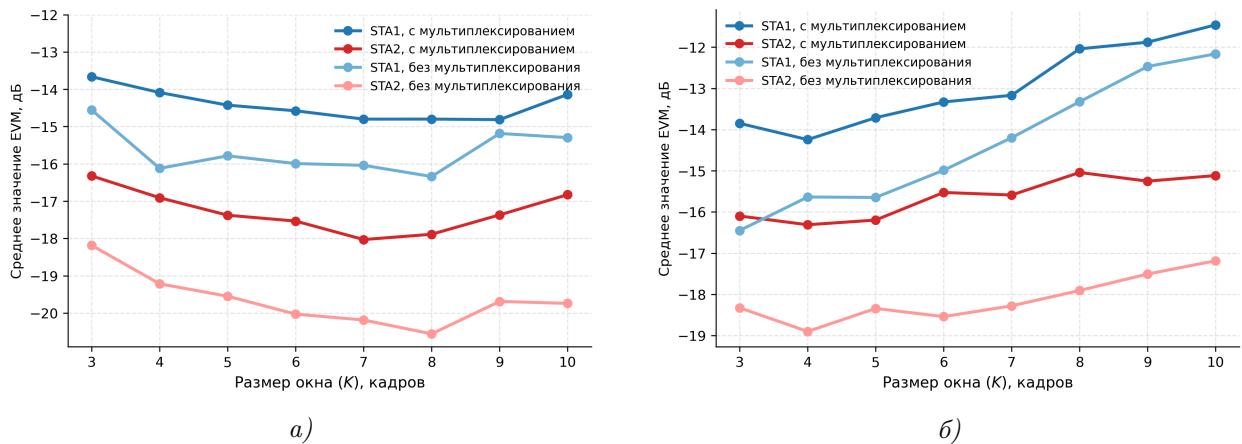


Рис. 4. Эффективность калибровки TLS в динамическом сценарии в зависимости от размера окна калибровки, для интервалов внутри окна а) 3 мс б) 15 мс.

качественные различия между результатами отсутствуют, далее рассматривается только динамический сценарий как более реалистичный.

Определим влияние качества оценки канала на производительность сети в целом. Первым шагом применим к оценкам канала калибровку TLS [19]. Калибровка осуществляется для канала 4×2 для каждой станции по отдельности. Варьируется размер окна K , т.е. количество измерений канала для проведения калибровки, а также интервал Δt между измерениями, по которым производится калибровка.

На рис. 4 представлены зависимости остаточных ошибок калибровки от размера окна K для двух интервалов Δt внутри окна: 3 мс (минимально возможный, соответствует последовательным кадрам в измеренных каналах) и 15 мс (более близкий к реальным сценариям). Качество калибровки оценивается по метрике EVM (англ. error vector magnitude), которая является нормой Фробениуса матрицы остаточной ошибки калибровки, т.е. разности матриц восходящего канала после применения калибровочного преобразования и нисходящего канала. Разница между явной и неявной оценками по метрике EVM составляет около 2 дБ в оптимальном случае (минимальная ошибка калибровки среди выбранных параметров), при этом для STA2, где калибровка осуществляется более точно из-за аппаратных особенностей (например, разницы мощности сигналов), разница между видами неявной оценки выше, чем для STA1.

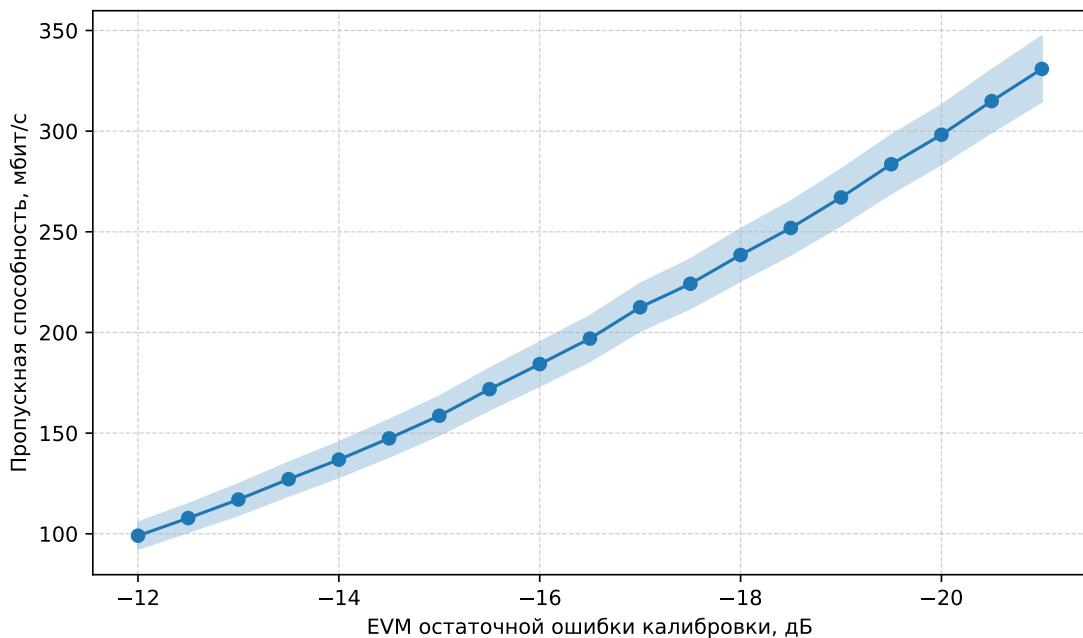


Рис. 5. Зависимость пропускной способности от остаточной ошибки калибровки с 95% доверительным интервалом.

С использованием среды имитационного моделирования NS-3 строится зависимость среднегеометрического значения пропускных способностей двух станций от величины остаточной ошибки калибровки, изображенная на рис. 5. В данной имитационной модели не учитываются накладные расходы на оценку канала, а также используются случайные ошибки калибровки с заданным EVM, что может отличаться от остаточных ошибок калибровки в реальных устройствах, но позволяет качественно оценить уровень производительности системы. Среднее значение разницы в 2 дБ между видами неявной оценки канала соответствует потере около 20–25% пропускной способности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для эффективного использования механизма MU-MIMO в сетях Wi-Fi следующего поколения при большом числе пользователей требуется сокращение накладных расходов на процедуру оценки канала. Это возможно сделать, используя неявную оценку канала. В данной работе реализован прототип устройства Wi-Fi на базе ПОР и рассмотрены два метода реализации неявной оценки канала: с последовательной и мультиплексированной отправкой пилотных сигналов. Эксперименты показали, что неявная оценка канала с мультиплексированием пилотных символов имеет уровень SINR на 2–4 дБ ниже, чем неявная оценка с последовательной отправкой кадров NDP. Это приводит к увеличению остаточной ошибки калибровки примерно на 2 дБ по метрике EVM и падению пропускной способности на 20–25% без учета накладных расходов на оценку канала. В дальнейших работах планируется рассмотреть алгоритмы компенсации искажений и нарушения ортогональности при неявной мультиплексированной оценке канала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khorov Evgeny, Levitsky Ilya, Akyildiz Ian F. Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7 // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 88664–88688.

2. A Comparison of Implicit and Explicit Channel Feedback Methods for MU-MIMO WLAN Systems / Lou Hanqing, Ghosh Monisha, Xia Pengfei, and Olesen Robert // Proceedings of the 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). — 2013. — P. 419–424.
3. Intelligent Feedback Overhead Reduction (iFOR) in Wi-Fi 7 and Beyond / Deshmukh Mrugen, Lin Zinan, Lou Hanqing, Kamel Mahmoud, Yang Rui, and Guvenc Ismail // Proceedings of the 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Spring). — 2022. — P. 1–5.
4. Closed-Form Approximations for the URLLC Capacity Using Queues / Karamyshev A, Porai E, , and Khorov E // Problems of Information Transmission. — 2024. — Vol. 60, no. 3. — P. 255–272.
5. Bankov D. et al. Performance Evaluation of Wi-Fi 7 Networks with Restricted Target Wake Time // Problems of Information Transmission. — 2024. — Vol. 60, no. 3. — P. 233–254.
6. A Tutorial on Wi-Fi 8: The Journey to Ultra High Reliability / Karamyshev A, Levitsky I, Bankov D, and Khorov E // Problems of Information Transmission. — 2025. — Vol. 61, no. 2. — P. 164–210.
7. Endovitskiy E., Loginov V., Khorov E. Adaptive selection of interpolation nodes to compress CSI in Wi-Fi networks // Problems of Information Transmission. — 2026. — Vol. 62, no. 2.
8. What Will Wi-Fi 8 Be? A Primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability / Galati-Giordano Leonardo, López-Pérez David, Li Ming, Garcia-Rodriguez Antonio, and Kasslin Mikael // IEEE Communications Magazine. — 2024. — Vol. 62, no. 8. — P. 126–132.
9. Study of Implicit Sounding Feedback in Wi-Fi Networks / Endovitskiy E. O., Klimakov A. V., Loginov V. A., Khorov E. M., and Shmelkin D. A. // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2022. — Vol. 67, no. Suppl. 2. — P. S233–S240.
10. Analysis of Channel Non-Reciprocity Due to Transceiver and Antenna Coupling Mismatches in TDD Precoded Multiuser MIMO-OFDM Downlink / Zou Yaning, Raeesi Orod, Anttila Lauri, Hakkarainen Ari, Vieira João, Tufvesson Fredrik, Cui Qimei, and Valkama Mikko // Proceedings of the IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall). — 2014. — P. 1–5.
11. Argos: Practical Many-Antenna Base Stations / Shepard Clayton, Yu Hang, Anand Nicholas, Li Li, Marzetta Thomas L., Yang Rohit, and Zhong Lin // Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2012). — 2012. — P. 53–64.
12. Hardware-Impairment Compensation for Enabling Distributed Large-Scale MIMO / Rogalin Ryan, Bur-salioglu Ozgun Y., Papadopoulos Haralabos C., Caire Giuseppe, and Molisch Andreas F. // Proceedings of the 2013 Information Theory and Applications Workshop (ITA). — 2013. — P. 1–10.
13. Opportunistic Channel Estimation for Implicit 802.11af MU-MIMO / Guerra Francesco, Merz Ruben, Widmer Jörg, and Le Boudec Jean-Yves // Proceedings of the 28th International Teletraffic Congress (ITC 28). — 2016. — P. 1–9.
14. How Accurate Calibration Is Needed in Massive MIMO? / Luo Jing, Gao Xiqi, You Xiaohu, and Han Shuangfeng // Proceedings of the 2015 IEEE Global Communications Conference Workshops (GLOBECOM Workshops). — 2015. — P. 1–6.
15. Large-Scale Antenna Systems with UL/DL Hardware Mismatch: Achievable Rates Analysis and Calibration / Zhang Wenjin, Ren Hui, Pan Cheng-Xiang, He Jiu-Chao, and Wang Xin // IEEE Transactions on Communications. — 2015. — Vol. 63, no. 4. — P. 1216–1229.
16. Multiuser Massive MIMO Performance with Calibration Errors / Luo Jing, Gao Xiqi, You Xiaohu, Han Shuangfeng, and Li Xiaohu // IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2016. — Vol. 15, no. 7. — P. 4521–4534.
17. Minasian Arin, Adve Raviraj S., ShahbazPanahi Shahram. The Impact of Hardware Calibration Errors on the Performance of Massive MIMO Systems // Proceedings of the 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). — 2016. — P. 1–6.
18. Mutual Coupling Calibration for Multiuser Massive MIMO Systems / Wei Hao, Wang Dongming, Zhu Huiling, Wang Jiangzhou, Sun Shaohui, and You Xiaohu // IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2016. — Vol. 15, no. 1. — P. 606–619.

19. Performance Analysis of Antenna Calibration in Coordinated Multi-Point Transmission System / Huang Fei, Geng Jie, Wang Yong, and Yang Dong // Proceedings of the 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC2010-Spring). — 2010. — P. 1–5.
20. Implicit Channel Sounding in IEEE 802.11 (Feasibility Study) : Rep. : 802.11-19/0767r1 / IEEE 802.11 Working Group ; executor: Doostnejad Ramin, Avital Ziv, Cariou Laurent et al. : 2019. — June. — IEEE 802.11 contribution.
21. Implicit Sounding Overhead Analysis : Rep. : 802.11-19/1268r0 / IEEE 802.11 Working Group ; executor: Schelstraete Steven, Latif Imran, Dash Debabrata, Wang Hao : 2019. — Sep. — IEEE 802.11 contribution.

Implicit MU-MIMO sounding procedures performance study

A.A. Tretiakov, E.O. Endovitskiy, I.A. Levitsky, V.A. Loginov, E.M. Khorov

The multi-user multiple-input multiple-output (MU-MIMO) mechanism is a key component of modern Wi-Fi networks, enabling substantial performance gains in dense multi-user scenarios. Current-generation Wi-Fi relies on explicit channel sounding, which involves a lengthy transmission of channel state information. To reduce this overhead, implicit sounding is considered. This work develops a Wi-Fi prototype based on software-defined radio that supports explicit sounding and two implicit sounding methods: one with sequential and one with simultaneous (multiplexed) pilot transmission from the stations. The latter shortens the sounding procedure, but our experiments show that it reduces the signal-to-interference-plus-noise ratio of the channel estimate by up to 4 dB compared with the sequential method. Due to the degradation in implicit channel-sounding quality, reciprocity-calibration errors arise, and the throughput of MU-MIMO transmissions decreases by 20–25% (not accounting for the channel-estimation overhead).

KEYWORDS: Wi-Fi 8, MU-MIMO, implicit sounding, pilot multiplexing, reciprocity calibration