

Научная статья
УДК 004.732.056
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-2-45-52>
EDN:DCXPUT

Энергетическая эффективность в многосотовых massive MIMO: влияние схем обработки и параметров аппаратной реализации

✉ Ван Донг Нгием ngiem.v@phystech.edu
✉ Александр Викторович Дворкович dvork.alex@gmail.com

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Москва, 117303, Российская Федерация

Аннотация

В работе исследуется компромисс между энергетической и спектральной эффективностью в многосотовых системах massive MIMO. Актуальность исследования обусловлена необходимостью одновременного повышения пропускной способности и снижения энергопотребления базовых станций в беспроводных сетях следующего поколения при росте числа антенн и обслуживаемых пользователей.

Цель исследования. Выявить влияние числа антенн базовой станции, количества обслуживаемых пользователей, схем линейной обработки сигнала и параметров аппаратной реализации на энергетическую эффективность многосотовых систем massive MIMO и определить конфигурации, обеспечивающие наилучший компромисс между энергетической и спектральной эффективностью.

Используемые методы. В статье разработана математическая модель системы massive MIMO, учитывающая число антенн базовой станции M , количество пользовательских устройств K , а также различные схемы линейной обработки сигналов (MR, ZF, RZF, S-MMSE, M-MMSE). В модель включены параметры потребляемой мощности, отражающие особенности аппаратной реализации, рассмотренные в виде двух наборов характеристик элементной базы. Оценка энергетической и спектральной эффективности выполнена на основе имитационного моделирования для различных конфигураций системы.

Результаты. Показано, что оптимальное соотношение числа антенн к количеству пользователей $M/K \approx 3-4$ обеспечивает максимальную энергетическую эффективность без существенного снижения спектральной производительности. Установлено, что алгоритмы M-MMSE и S-MMSE демонстрируют наилучшие показатели энергетической эффективности при умеренной вычислительной сложности, особенно при использовании улучшенной аппаратной базы. Полученные зависимости подтверждают наличие выраженного оптимума энергетической эффективности при увеличении числа антенн базовой станции.

Новизна работы заключается в комплексном анализе компромисса между энергетической и спектральной эффективностью в многосотовых системах massive MIMO с одновременным учетом схем линейной обработки сигналов и параметров аппаратной реализации, что позволяет обосновать практические рекомендации по выбору конфигурации базовых станций в условиях технологических ограничений.

Практическая значимость. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и оптимизации энергоэффективных многосотовых систем massive MIMO для беспроводных сетей связи следующего поколения с учетом технологических ограничений аппаратной реализации и требований к качеству обслуживания.

Ключевые слова: massive MIMO, спектральная эффективность, энергетическая эффективность, обработка сигналов, беспроводные сети 5G

Ссылка для цитирования: Нгием В.Д., Дворкович А.В. Энергетическая эффективность в многосотовых massive MIMO: влияние схем обработки и параметров аппаратной реализации // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 2. С. 45–52. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-2-45-52. EDN:DCXPUT

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-2-45-52>
EDN:DCXPUT

Energy Efficiency in Multi-Cell Massive MIMO: Impact of Signal Processing Schemes and Hardware Implementation Parameters

✉ Van Dong Nghiem, ngiem.v@phystech.edu
Aleksandr V. Dvorkovich, dvork.alex@gmail.com

Moscow Institute of Physics and Technology,
Moscow, 117303, Russian Federation

Annotation

*This paper investigates the trade-off between energy efficiency and spectral efficiency in multi-cell massive MIMO systems. The **relevance** of the study is driven by the need to simultaneously increase throughput and reduce the energy consumption of base stations in next-generation wireless networks, given the growing number of antennas and served users.*

*The **purpose of the study** is to determine how the number of base-station antennas, the number of served users, linear signal processing schemes, and hardware implementation parameters affect the energy efficiency of multi-cell massive MIMO systems, and to identify configurations that provide the best trade-off between energy and spectral efficiency.*

***Methods.** A mathematical model of a massive MIMO system is developed, taking into account the number of base station antennas M , the number of user equipment K , and various linear signal processing schemes, including MR, ZF, RZF, S-MMSE, and M-MMSE. The model incorporates power consumption parameters reflecting hardware implementation characteristics, represented by two different sets of component specifications. The evaluation of energy and spectral efficiency is carried out using simulation-based analysis for various system configurations.*

***Results.** The results show that an optimal antenna-to-user ratio of $M/K \approx 3-4$ achieves maximum energy efficiency without a significant reduction in spectral efficiency. It is demonstrated that the M-MMSE and S-MMSE algorithms provide the highest energy efficiency performance with moderate computational complexity, particularly when improved hardware components are employed. The obtained results confirm the existence of a pronounced energy efficiency optimum as the number of base station antennas increases.*

*The **novelty** of this work lies in the comprehensive analysis of the energy-spectral efficiency trade-off in multi-cell massive MIMO systems while jointly accounting for linear signal processing schemes and hardware implementation parameters, which enables the formulation of practical recommendations for base station configuration under technological constraints.*

***Practical significance.** The findings of this study can be applied to the design and optimization of energy-efficient multi-cell massive MIMO systems for next-generation wireless communication networks, taking into account hardware implementation constraints and quality-of-service requirements.*

Keywords: massive MIMO, spectral efficiency, energy efficiency, signal processing, 5G wireless networks

For citation: Nghiem V.D., Dvorkovich A.V. Energy Efficiency in Multi-Cell Massive MIMO: Impact of Signal Processing Schemes and Hardware Implementation Parameters. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(2):45–52. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-2-45-52. EDN:DCXPUT

Введение

Современные беспроводные сети сталкиваются с вызовами, связанными с необходимостью обеспечения высокой пропускной способности при одновременном снижении энергопотребления.

Технология massive MIMO, предполагающая использование большого числа антенн на базовых станциях, предлагает решение этой проблемы за счет пространственного мультиплексирования сигналов и рассматривается многими российскими

ми учеными [1–4]. Однако увеличение числа антенн и пользователей приводит к росту энергопотребления, что требует тщательного анализа и оптимизации компромисса между энергетической (EE) и спектральной (SE) эффективностью [5]. Исследования в области компромисса между EE и SE в системах massive MIMO активно развиваются. В работе [6] предложен подход к оптимизации выбора этого компромисса с использованием многокритериального адаптивного генетического алгоритма. Авторы [7] рассматривают методы повышения EE в сетях 5G с использованием massive MIMO, выделяя ключевые проблемы и возможные решения. В [8] представлен анализ компромисса EE–SE в нисходящем канале massive MIMO с учетом распределения мощности и числа антенн. Работа [9] фокусируется на оптимизации компромисса EE–SE в системах massive MIMO с использованием статистической информации о канале. Наконец, в [10] рассматривается влияние различных конфигураций массивов антенн на EE систем massive MIMO.

Постановка задачи

Целью данной работы является разработка методов оптимизации EE и SE в системах massive MIMO. Необходимо определить оптимальное соотношение между числом антенн на базовых станциях и количеством обслуживаемых пользователей, при котором достигается максимальная EE без значительного снижения SE. Также требуется анализ влияния различных схем обработки сигналов на указанные метрики.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели использованы следующие методы:

- 1) математическое моделирование систем massive MIMO с различными параметрами (число антенн, количество пользователей, схемы обработки сигналов);
- 2) анализ EE и SE при различных конфигурациях системы;
- 3) применение многокритериальных методов оптимизации для поиска рационального компромисса между EE и SE;
- 4) имитационное моделирование для валидации полученных результатов.

Порядок проведения исследования включает несколько последовательных этапов, направленных на всесторонний анализ характеристик систем massive MIMO. На начальном этапе была разработана математическая модель системы, учитывающая ключевые параметры: количество антенн на базовой станции (M), число пользователей в системе (K), а также различные схемы обработки сигналов, включая минимизацию среднеквадратичной ошибки с учетом мультипользовательского искажения

(M-MMSE, аббр. от англ. Multi-cell Minimum Mean Square Error), упрощенную минимизацию (S-MMSE, аббр. от англ. Single-cell Minimum Mean Square Error), регуляризованное «форсирование нуля» (RZF, аббр. от англ. Regularized Zero Forcing), классическое «форсирование нуля» (ZF, аббр. от англ. Zero Forcing) и метод максимального отношения (MR, аббр. от англ. Maximal Ratio).

Далее исследование было сосредоточено на анализе EE и SE в зависимости от значений M и K . Особое внимание уделялось выявлению оптимального соотношения между числом антенн и количеством пользователей, обеспечивающего максимальную EE без значительной потери SE.

Следующим шагом стало сравнительное исследование указанных схем обработки сигналов с точки зрения показателей EE и SE. Это позволило установить, какие алгоритмы обеспечивают наилучший компромисс между расходом энергии и пропускной способностью системы при различных условиях эксплуатации.

Для проверки достоверности теоретических выкладок было проведено имитационное моделирование, результаты которого подтвердили корректность предложенной модели и допущений. Анализ полученных данных показал, что в условиях преднамеренных внешних помех при правильной настройке параметров системы возможно достичь повышения помехоустойчивости каналов связи в massive MIMO, что является важным результатом для повышения надежности и устойчивости современных беспроводных сетей.

Изложение основного материала

В данном исследовании рассматривается многосотовая система massive MIMO. В каждой ячейке базовая станция оснащена M антеннами и одновременно обслуживает K пользовательских устройств (UE). Канал стационарен внутри когерентного блока длиной τ_c символов. Для оценки канала используются ортогональные пилотные последовательности длиной τ_p символов.

Коэффициент повторного использования пилотов принят равным $f = 1$. При таком выборе во всех ячейках применяется одинаковый набор пилотов. Внутри одной ячейки для исключения внутрисотовой интерференции пилоты назначаются ортогонально, что минимально требует $\tau_p = K$. Данное условие гарантирует корректную оценку внутрисотовых каналов и позволяет фокусировать внимание на влиянии межсотового переиспользования пилотов на помехоустойчивость и пропускную способность. Альтернативные варианты $f > 1$ увеличивают τ_p и снижают долю полезных данных в τ_c , поэтому в рамках сравнения выбран базовый вариант $f = 1$ с минимально необходимой длиной пилотных сигналов.

SE оценивается через среднюю пропускную способность на ячейку R_{cell} (Мбит/с) с учетом доли пилотных сигналов $(1 - \tau_p/\tau_c)$ и схемы обработки сигналов. EE определяется как отношение суммарной полезной пропускной способности к полной потребляемой мощности P_{tot} , измеряемой в Вт (Дж/с), поэтому единица измерения EE – Мбит/Дж:

$$EE = R_{\text{cell}}/P_{\text{tot}}. \quad (1)$$

Для анализа масштабируемости дополнительно рассматривается пропускная способность на единицу площади R_{area} при фиксированной плотности размещения ячеек.

Рассмотрим модель схмотехнического энергопотребления (CP, аббр. от англ. Circuit Power).

Полная потребляемая мощность представляется в виде:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{TX}} + P_{\text{PA}} + P_{\text{BB}}(M, K, S) + P_{\text{RF}}(M) + P_{\text{FH}} + P_{\text{FIX}}, \quad (2)$$

где S – выбранная схема обработки; P_{TX} – излучаемая радиочастотная мощность на антенну, суммированная по всем антеннам; $P_{\text{PA}} = P_{\text{RF,out}}/\eta_{\text{PA}}$ – мощность, расходуемая усилителями мощности; η_{PA} – коэффициент полезного действия (КПД) усилителей мощности; $P_{\text{BB}}(M, K, S)$ – мощность, потребляемая для цифровой обработки сигнала в базовой полосе, включающей оценку канала, формирование / разрешение лучей и детектирование, и зависящая от алгоритмической сложности выбранной схемы; $P_{\text{RF}}(M)$ – потребление ВЧ-тракта на антенну (фильтры, преобразователи сигналов, АЦП / ЦАП), масштабируется по M ; P_{FH} – мощность, потребляемая транспортной (транзитной) сетью, соединяющей базовую станцию с центром обработки; P_{FIX} – нагрузка, не зависящая от M и K (системные накладные расходы, охлаждение и т. п.).

В исследовании используются два набора параметров модели CP (таблица 1). Первый соответствует консервативным оценкам элементной базы. Второй отражает улучшенную аппаратную реализацию (уменьшенные удельные мощности ВЧ-трактов и вычислительных блоков), что позволяет оценить чувствительность EE к технологическим изменениям.

В рамках исследования проведено сравнение наиболее распространенных линейных алгоритмов обработки сигналов в системах massive MIMO. Рассмотрены следующие варианты [11]:

1) MR – метод согласования сигнала с каналом, при котором вектор передачи формируется пропорционально отклику канала, характеризующийся минимальной вычислительной сложностью и низкой способностью к подавлению межпользовательских помех;

2) ZF – алгоритм, обеспечивающий подавление межпользовательских помех путем обращения

матрицы канала; для его корректной работы необходимо выполнение условия $M > K$;

3) RZF – модификация ZF с регуляризацией, позволяющая балансировать между усилением полезного сигнала и подавлением помех;

4) S-MMSE – метод минимизации среднеквадратичной ошибки с использованием только внутрисотовой информации о каналах;

5) M-MMSE – усовершенствованный алгоритм, учитывающий межсотовую статистическую информацию, что повышает эффективность подавления помех, но сопровождается увеличением вычислительных затрат.

ТАБЛИЦА 1. Наборы параметров модели CP для двух вариантов аппаратной реализации

TABLE 1. CP Model Parameter Sets for Two Hardware Implementation Scenarios

Компонент мощности	Обозначение	Консервативный набор	Улучшенный набор
Излучаемая мощность	P_{TX} , Вт/антенну	0,1	0,1
КПД усилителя мощности	η_{PA}	0,25	0,4
Потребляемая мощность ВЧ-тракта на антенну	$P_{\text{RF}}(M)$, Вт/антенну	0,3	0,15
Потребляемая мощность цифровой обработки на одного абонента	$P_{\text{BB}}(M, K, S)$, Вт/UE	0,5	0,25
Потребляемая мощность транспортной сети	P_{FH} , Вт	5	3
Системные накладные расходы	P_{FIX} , Вт	10	5

С точки зрения вычислительной сложности, обработка в схеме MR требует минимальных ресурсов. Алгоритмы ZF и RZF используют матрицы размером $K \times K$, тогда как S-MMSE и M-MMSE работают с матрицами размером $M \times M$ и дополнительно используют расширенный набор статистических данных, что повышает нагрузку на блок базовой полосы P_{BB} и, следовательно, влияет на энергетическую эффективность системы.

Анализ экспериментальных условий проводится для двух сценариев: $K = 10$ и $K = 20$ при изменении числа антенн M от 10 до 200 с шагом 10. Для алгоритма ZF дополнительно соблюдается условие $M > K$. Доля времени когерентного блока, затрачиваемая на передачу пилотных последовательностей, определяется как $\tau_p/\tau_c = K/\tau_c$. Структура пилотных сигналов задается коэффициентом повторного использования $f = 1$, что предполагает идентичный набор пилотов во всех ячейках и

обеспечивает минимальную длину пилотной последовательности $\tau_p = K$.

Коэффициент полезного действия усилителей мощности η_{PA} принят выше 0,25. Такое значение объясняется распределением суммарной излучаемой мощности между большим числом антенн, что снижает требования к линейности отдельных усилителей и позволяет использовать более эффективные схемы усиления, включая архитектуры класса Doherty и усилители с отслеживанием огибающей. Остальные компоненты полной потребляемой мощности P_{tot} параметризованы через два набора значений – «консервативный» и «улучшенный», что обеспечивает воспроизводимость расчетов и возможность оценки влияния технологических факторов на энергетическую эффективность.

Для каждой тройки параметров (M, K, S) , где S – схема обработки, выполняются следующие шаги.

Шаг 1. Определяется SE с учетом времени, затраченного на передачу пилотных сигналов, и межсотового переиспользования пилотов:

$$SE = \left(1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}\right) \cdot \sum_{k=1}^K \log_2(1 + SINR_k), \quad (3)$$

где τ_p – длина пилотной последовательности; τ_c – длина когерентного блока; $SINR_k$ – отношение сигнал / шум + помеха для k -го пользователя.

Шаг 2. На основе модели CP рассчитывается полная мощность P_{tot} :

$$P_{tot} = M \cdot \left(\frac{P_{TX}}{\eta_{PA}} + P_{RF}\right) + K \cdot P_{BB}(M, K, S) + P_{FH} + P_{FIX}. \quad (4)$$

3) Вычисляется EE как отношение суммарной полезной пропускной способности к P_{tot} :

$$EE = \frac{R_{cell}}{P_{tot}}, \quad (5)$$

где R_{cell} – суммарная пропускная способность на ячейку.

Если ширина полосы B известна, то:

$$R_{cell} = B \cdot SE_{norm}, \quad (6)$$

где B – это скорость передачи символов (ширина полосы в Гц); SE_{norm} – нормализованная спектральная эффективность в бит/(с·Гц), т.е. уже учтена доля пилотных сигналов и схемы обработки.

Подставляя выражение для SE, получаем:

$$R_{cell} = B \cdot \left(1 - \frac{K}{\tau_c}\right) \cdot \sum_{k=1}^K \log_2(1 + SINR_k). \quad (7)$$

Если B не указана, то R_{cell} может быть выражена в бит/символ и численно совпадает со значением SE.

Шаг 4. Строится зависимость EE от SE при изменении числа антенн M при фиксированном K .

Шаг 5. Определяется диапазон значений M , при котором достигаются значения EE, близкие к максимальным, без существенного снижения SE:

$$EE(M) \approx \max_M EE(M) \quad \text{при} \quad SE(M) \geq SE_{min}. \quad (8)$$

Шаг 6. Выполняется сравнительный анализ схем обработки по критерию компромисса EE–SE по формулам (3, 5).

Для оценки влияния числа антенн базовой станции на EE и SE при фиксированном числе пользователей проведено моделирование по описанной выше методике. На рисунке 1 представлена зависимость EE от средней пропускной способности на одну ячейку для различных схем обработки сигналов. Моделирование выполнено для сценария с $K = 10$ обслуживаемыми пользователями при изменении числа антенн базовой станции M от 10 до 200 с шагом 10. Параметры системы соответствуют ранее описанным условиям, включая коэффициент повторного использования пилотов $f = 1$, длину пилотной последовательности $\tau_p = K$ и два набора параметров CP.

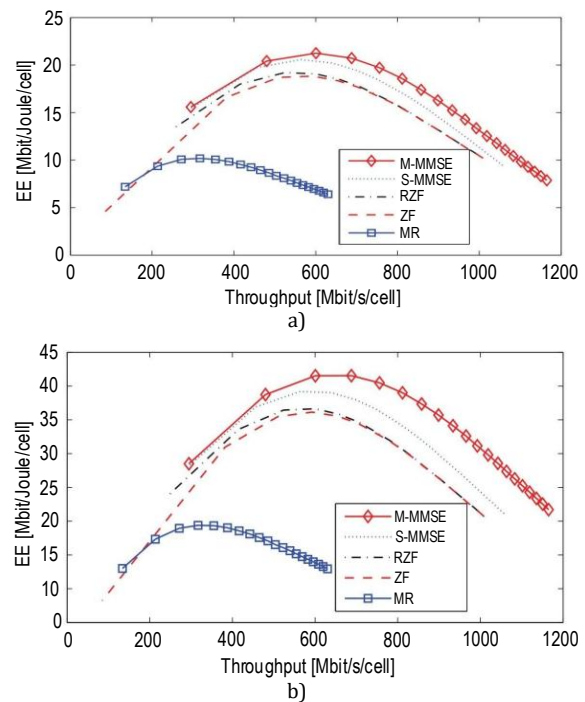


Рис. 1. EE в зависимости от средней пропускной способности на ячейку при всех схемах обработки ($K = 10$): а) с первым набором значений; б) со вторым набором

Fig. 1. EE Versus the Average Throughput Per Cell for All Processing Schemes ($K = 10$): a) First Parameter Set; b) Second Parameter Set

Сравнительный анализ схем обработки показал, что M-MMSE обеспечивает наибольшие значения EE во всем диапазоне моделирования. Максимум 21,26 Мбит/Дж достигается при $M = 30$ (соответствует средней пропускной способности 600 Мбит/с

на ячейку или 9,6 Гбит/с·км²). При $M = 40$ ЕЕ снижается незначительно – до 20,73 Мбит/Дж – при росте пропускной способности до 11 Гбит/с·км².

S-MMSE демонстрирует близкие результаты: оптимум достигается также при $M = 30$, однако ЕЕ на 3,2 % ниже, а пропускная способность на 6 % меньше по сравнению с M-MMSE.

RZF и ZF показывают сопоставимые значения, максимизируя ЕЕ на уровне около 19 Мбит/Дж при $M = 30$ и соответствующей плотности пропускной способности 8,38 Гбит/с·км².

MR демонстрирует наименьшие значения ЕЕ в исследуемом диапазоне параметров.

Отмечено, что при увеличении пропускной способности схемы RZF и ZF начинают приближаться по эффективности к M-MMSE и S-MMSE. Тем не менее, для сценария с $K = 10$ дополнительные вычислительные затраты, связанные с применением M-MMSE, оправданы за счет одновременно высокого уровня ЕЕ и SE.

Обратим внимание, что для ZF ЕЕ быстро ухудшается при пропускной способности менее 380 Мбит/с на ячейку (наблюдается при $M \approx K$, где эта схема, как известно, работает плохо). Для MR максимальная ЕЕ составляет 10,18 Мбит/Дж при $M = 40$ и пропускной способности 5,07 Гбит/с·км².

Данные рисунка 1b получены со вторым набором значений из таблицы 1. По сравнению с рисунком 1a ЕЕ всех схем увеличивается примерно вдвое, поскольку большинство параметров модели СР во втором наборе уменьшено примерно в два раза, но общие тенденции сохраняются. Для M-MMSE и S-MMSE значения ЕЕ достигают 41,52 и 39,2 Мбит/Дж соответственно при $M = 30$. В таблице 2 представлены значения ЕЕ и пропускной способности по площади для схем M-MMSE, RZF и MR при $K = 10$ и $M = 40$. В этом случае ЕЕ достигает максимума примерно при $M = 30$ или 40 независимо от значений параметров СР. Хотя указанные значения числа антенн M существенно ниже типичных прогнозов для систем massive MIMO [12–14], максимальная ЕЕ достигается при ожидаемом соотношении $M/K \approx 3$ –4. При увеличении K оптимальное значение M возрастает, особенно при использовании более энергоэффективного оборудования.

ТАБЛИЦА 2. Максимальная ЕЕ на ячейку с двумя наборами значений СР для M-MMSE, RZF и MR

TABLE 2. Maximum Cell EE for Two CP Parameter Sets for M-MMSE, RZF, and MR

Сценарий	Схема обработки	ЕЕ, Мбит/Дж		Пропускная способность по площади, Гбит/с/км ²
		набор 1	набор 2	
$K = 10$, $M = 40$	M-MMSE	23,73	41,52	11
	RZF	19,07	36,63	9,6
	MR	10,18	19,38	5,07
$K = 20$, $M = 60$	M-MMSE	20,12	38,45	12,3
	RZF	18,34	34,92	10,8
	MR	9,67	17,21	6,02

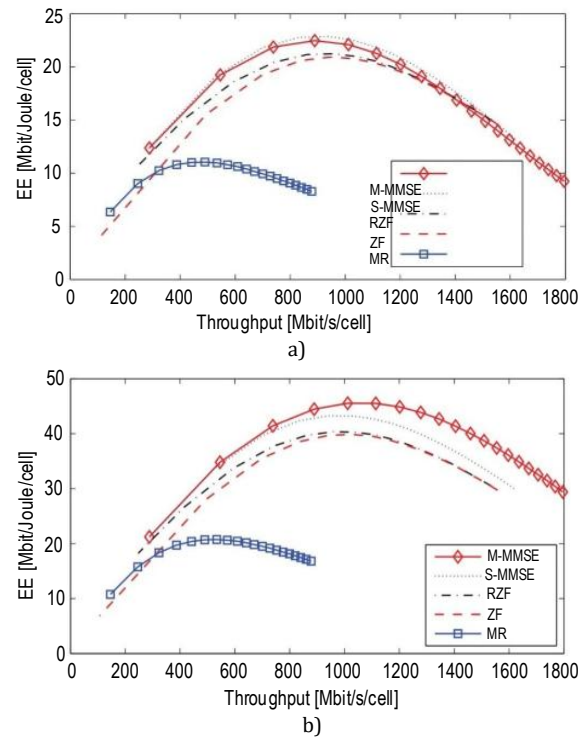


Рис. 2. ЕЕ в зависимости от средней пропускной способности на ячейку при всех схемах обработки ($K = 20$): с первым (а) и со вторым (б) набором значений в таблице 1

Fig. 2. EE Versus the Average Throughput Per Cell for All Processing Schemes ($K = 20$): (a) First Parameter Set; (b) Second Parameter Set from Table 1

На рисунке 2 показаны результаты для $K = 20$. Значения пропускной способности получены для всех схем обработки, кроме ZF, при изменении M от 10 до 200 с шагом 10; для ZF рассматривались только значения $M > K$, поэтому M изменялось от 20 до 200. Рисунок 2b показывает, что увеличение числа UE в ячейке может положительно влиять на ЕЕ, тогда как из рисунка 2a следует, что при $K = 20$ и первом наборе параметров СР наибольшая ЕЕ достигается не для M-MMSE, а для S-MMSE. С количественной точки зрения S-MMSE обеспечивает максимальную ЕЕ 22,86 Мбит/Дж при $M = 50$ и пропускной способности 15,05 Гбит/с·км², демонстрируя наилучший компромисс между ЕЕ и SE в данном сценарии. Это связано с тем, что вычислительная составляющая СР для M-MMSE значительно выше, чем для S-MMSE, RZF и ZF, и тем самым частично компенсирует выигрыш M-MMSE по SE.

Для второго набора значений СР можно сделать различные наблюдения, как видно на рисунке 2b. В этом случае общие тенденции соответствуют графикам на рисунке 1, где M-MMSE обеспечивает наивысший уровень ЕЕ и пропускной способности. Кроме того, увеличение количества UE на ячейку положительно влияет на ЕЕ всех цепей, которая больше при любом значении пропускной способности. В отличие от сценария с $K = 10$ на рисунке 1b, где максимальная ЕЕ достигается при $M = 30$ или 40,

при $K = 20$ наибольшая ЕЕ наблюдается при $M = 50$ или 60.

При обслуживании большого количества UE и одновременном увеличении числа антенн на базовой станции (для компенсации межпользовательских помех) ЕЕ сети может быть повышена, но только при условии, что преимущества и затраты на развертывание дополнительного оборудования сбалансированы.

Разработанная модель СР в этом разделе существенно зависит от аппаратной конфигурации (т. е. от количества антенн M и пользователей K), а также от выбора параметров модели, приведенных в таблице 1.

Сравнительный анализ схем обработки показал следующее:

- S-MMSE требует больше вычислительных ресурсов, чем RZF и ZF, поскольку использует матрицы размером $M \times M$, тогда как RZF и ZF – только $K \times K$;

- M-MMSE по вычислительной сложности близок к S-MMSE, однако его дополнительная нагрузка на СР частично компенсируется более эффективной оценкой межсотовых каналов;

- MR обладает наименьшей вычислительной сложностью и, соответственно, минимальным СР, поскольку не требует обращения матриц.

Тем не менее, благодаря высокой вычислительной эффективности современных систем, различия в вычислительной нагрузке между схемами

обработки оказывают лишь незначительное влияние на общий СР – он остается примерно одинаковым для всех алгоритмов.

В структуре полной потребляемой мощности наибольший вклад вносит приемно-передающий тракт (усилители мощности, ВЧ-фильтры, АЦП / ЦАП). За ним следует фиксированная мощность – системные накладные расходы, охлаждение и прочие постоянные компоненты. Далее – оценка канала, которая одинакова для всех схем обработки при фиксированном числе пользователей.

Мощность, потребляемая транспортной сетью, а также кодированием и декодированием, составляет лишь незначительную долю общего СР в massive MIMO, особенно при большом числе антенн на базовой станции.

Заключение

Проведенное исследование показало, что в системах massive MIMO существует оптимальное соотношение между числом антенн на базовой станции и количеством обслуживаемых пользователей, при котором достигается максимальная энергетическая эффективность без существенного снижения спектральной эффективности. Наиболее эффективными по показателю ЕЕ оказались схемы обработки сигналов M-MMSE и S-MMSE. Результаты моделирования могут быть использованы для проектирования и оптимизации энергосберегающих беспроводных сетей следующего поколения.

Список источников

1. Арсамерзуева А.У., Тасуева Х.З.А., Чадаев А.К. Применение технологий MIMO для повышения эффективности в инфокоммуникационных сетях // XII Всероссийская научно-практическая конференция «Молодежь, наука, инновации» (Грозный, Российская Федерация, 18 октября 2023 г.). Грозный: Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д. Миллионщикова, 2023. С. 31–35. DOI:10.26200/GSTOU.2023.95.35.004. EDN:LNURUDH
2. Алиев И.В. Спектральная эффективность в massive MIMO // Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы телекоммуникаций» (Новосибирск, Российская Федерация, 19–20 апреля 2023 г.). Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2023. С. 380–385. DOI:10.55648/978-5-91434-084-8-2023-274-278 EDN:YUWOKI
3. Свиридова И.В., Хорошайлов Р.Н., Лялин Д.В. Анализ методов MIMO для 5G и последующих технологий: преимущества и недостатки // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 8. С. 100–104. DOI:10.18127/j00338486-202308-16. EDN:YIBXZQ
4. Аль-Раби М., Аль-Раби М. Анализ эффективности массовой MIMO системы восходящей связи при использовании канала с замираниями Накагами-М // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2017. Т. 60. № 1(655). С. 18–24. DOI:10.20535/S0021347017010022. EDN:ZQMSFN
5. Севрюков А.Е., Осипов Н.С. Влияние конфигурации систем MIMO на энергетические параметры радиолинии // III Всероссийская научно-практическая конференция «Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения», Курск, Российская Федерация, 11–13 мая 2016 г.). Курск: Юго-Западный государственный университет, 2016. С. 105–110. EDN:WXQXMX
6. Björnson E., Larsson E.G., Marzetta T.L. Massive MIMO: ten myths and one critical question // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. Iss. 2. PP. 114–123. DOI:10.1109/MCOM.2016.7402270
7. Halbauer H., Weber A., Wiegner D., Wild T. (2019). Energy Efficient Massive MIMO Array Configurations // IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 09–13 December 2018). IEEE, 2019. DOI:10.1109/GLOCOMW.2018.8644331
8. Hoydis J., ten Brink S., Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of Cellular Networks: How Many Antennas Do We Need? // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2013. Vol. 31. Iss. 2. PP. 160–171. DOI:10.1109/JSAC.2013.130205
9. Liu W., Han S., Yang C. Is massive MIMO energy efficient? arXiv:1505.07187. 2015.
10. Ngo H.Q., Larsson E.G., Marzetta T.L. Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems // IEEE Transactions on Communications. 2013. Vol. 61. Iss. 4. PP. 1436–1449. DOI:10.1109/TCOMM.2013.020413.110848

11. Prasad K.N.R.S.V., Hossain E., Bhargava V.K. Energy Efficiency in Massive MIMO-Based 5G Networks: Opportunities and Challenges // arXiv:1511.08689. 2015.
12. Salh A., Audah L., Shah N.S.M., Hamzah S.A. Trade-Off Energy and Spectral Efficiency in a Downlink Massive MIMO System // *Wireless Personal Communications*. 2019. Vol. 106. PP. 897–910. DOI:10.1007/s11277-019-06194-4. EDN:OHCHSG
13. Sanguinetti L., Björnson E., Hoydis J. Toward Massive MIMO 2.0: Understanding Spatial Correlation, Interference Suppression, and Pilot Contamination // *IEEE Transactions on Communications*. 2020. Vol. 68. Iss. 1. PP. 232–257. DOI:10.1109/tcomm.2019.2945792. EDN:JGHAGN
14. Hei Y., Zhang C., Song W., Kou Y. Energy and spectral efficiency tradeoff in massive MIMO systems with multi-objective adaptive genetic algorithm // *Soft Computing*. 2019. Vol. 23. PP. 7163–7179. DOI:10.1007/s00500-018-3356-x. EDN:XJLOUS

References


1. Arsamerzueva A.U., Tasueva Kh.Z.A., Chadaev A.K. Application of MIMO Technologies to Improve Efficiency in Infocommunication Networks. *Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference "Youth, Science, Innovation", 18 October 2023, Grozny, Russian Federation*. Grozny: GSTOU named after M.D. Millionshchikov Publ.; 2023. p.31–35. (in Russ.) DOI:10.26200/GSTOU.2023.95.35.004. EDN:LNRUDH
2. Aliyev I.V. Spectral Efficiency in Massive MIMO. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation on Modern Problems of Telecommunications, 19–20 April 2023, Novosibirsk, Russian Federation*. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics Publ.; 2023. p.380–385. (in Russ.) DOI:10.55648/978-5-91434-084-8-2023-274-278 EDN:YUWOKI
3. Sviridova I.V., Khoroshailov R.N., Lyalin D.V. Analysis of MIMO Methods for 5G and Subsequent Technologies: Advantages and Disadvantages. *Radioengineering*. 2023;87(8):100–104. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-202308-16. EDN:YIBXZQ
4. AL-Rawi M., AL-Rawi M. Performance of Massive MIMO Uplink System Over Nakagami-m Fading Channel. *Radioelectronics and Communications Systems* 2017;60(1):18–24. (in Russ.) DOI:10.20535/S0021347017010022. EDN:ZQMSFN
5. Sevryukov A.E., Osipov N.S. Influence Configuration MIMO Radio Systems for Energy Parameters. *Proceedings of the IIIrd All-Russian Scientific and Practical Conference "Infocommunications and Information Security: Status, Problems and Solutions", 11–13 May 2016, Kursk, Russian Federation*. Kursk: Southwest State University Publ.; 2016. p.105–110. (in Russ.) EDN:WXQXMX
6. Björnson E., Larsson E.G., Marzetta T.L. Massive MIMO: ten myths and one critical question. *IEEE Communications Magazine*. 2016;54(2):114–123. DOI:10.1109/MCOM.2016.7402270
7. Halbauer H., Weber A., Wiegner D., Wild T. (2019). Energy Efficient Massive MIMO Array Configurations. *IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps, 09–13 December 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/GLOCOMW.2018.8644331
8. Hoydis J., ten Brink S., Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of Cellular Networks: How Many Antennas Do We Need? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2013;31(2):160–171. DOI:10.1109/JSAC.2013.130205
9. Liu W., Han S., Yang C. Is massive MIMO energy efficient? *arXiv:1505.07187*. 2015.
10. Ngo H.Q., Larsson E.G., Marzetta T.L. Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems. *IEEE Transactions on Communications*. 2013;61(4):1436–1449. DOI:10.1109/TCOMM.2013.020413.110848
11. Prasad K.N.R.S.V., Hossain E., Bhargava V.K. Energy Efficiency in Massive MIMO-Based 5G Networks: Opportunities and Challenges. *arXiv:1511.08689*. 2015.
12. Salh A., Audah L., Shah N.S.M., Hamzah S.A. Trade-Off Energy and Spectral Efficiency in a Downlink Massive MIMO System. *Wireless Personal Communications*. 2019;106:897–910. DOI:10.1007/s11277-019-06194-4. EDN:OHCHSG
13. Sanguinetti L., Björnson E., Hoydis J. Toward Massive MIMO 2.0: Understanding Spatial Correlation, Interference Suppression, and Pilot Contamination. *IEEE Transactions on Communications*. 2020;68(1):232–257. DOI:10.1109/tcomm.2019.2945792. EDN:JGHAGN
14. Hei Y., Zhang C., Song W., Kou Y. Energy and spectral efficiency tradeoff in massive MIMO systems with multi-objective adaptive genetic algorithm. *Soft Computing*. 2019;23:7163–7179. DOI:10.1007/s00500-018-3356-x. EDN:XJLOUS

Статья поступила в редакцию 14.01.2026; одобрена после рецензирования 04.03.2026; принята к публикации 16.03.2026


The article was submitted 14.01.2026; approved after reviewing 04.03.2026; accepted for publication 16.03.2026

Информация об авторах:

**НГИЕМ
Ван Донг**

аспирант кафедры мультимедийных технологий и телекоммуникаций Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)
 <https://orcid.org/0009-0006-6318-294X>

**ДВОРКОВИЧ
Александр Викторович**

доктор технических наук, профессор, профессор РАН, член-корреспондент РАН, ведущий кафедрой мультимедийных технологий и телекоммуникаций Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)
 <https://orcid.org/0000-0003-1190-3582>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.