

Адаптивное гибридное прекодирование в системах MU-MIMO с пространственной корреляцией каналов

К. К. Фам

*Санкт-Петербургский
государственный университет
телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

E-mail fam.kk@sut.ru

Е. И. Глушанков

*Санкт-Петербургский
государственный университет
телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

E-mail glushankov.ei@sut.ru

Т. З. Ву

*Санкт-Петербургский
государственный университет
телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

E-mail vuthe duy et 99 @ gmail . com

Аннотация. В статье решается проблема компромисса между спектральной эффективностью и вычислительной сложностью методов устранения многопользовательской интерференции в системах MU-MIMO. Традиционные линейные методы, такие как принудительное обнуление помех (Zero-Forcing, ZF), минимизируют вычислительные затраты, но демонстрируют критическую деградацию производительности из-за эффекта усиления шума в условиях высокой пространственной корреляции каналов. Напротив, нелинейные алгоритмы, в частности прекодирование Томлинсона–Харашимы (Tomlinson–Harashita Precoding, THP), обеспечивают высокую помехоустойчивость, однако сопряжены со значительными аппаратными ресурсами. В данной работе предложен алгоритм адаптивного гибридного прекодирования, реализующий динамическое переключение стратегий обработки сигнала на основе анализа обусловленности канальной матрицы. Разработанный механизм использует число обусловленности в качестве метрики для селекции оптимального режима (ZF или THP), что позволяет адаптироваться к мгновенным изменениям состояния канала. Результаты имитационного моделирования подтверждают, что предложенный подход обеспечивает квазиоптимальный баланс: в условиях сильной корреляции система приближается к показателям помехоустойчивости THP, а в благоприятных условиях радиораспространения сохраняет вычислительную эффективность ZF.

Ключевые слова: MU-MIMO; OFDM; прекодирование ZF; прекодирование THP; гибридное прекодирование; число обусловленности; пространственная корреляция

I. ВВЕДЕНИЕ

Экспоненциальный рост мобильного трафика и увеличение плотности абонентских терминалов формируют жесткие требования к спектральной эффективности сетей связи пятого (5G) и шестого (6G) поколений. Ключевым инструментом удовлетворения этих требований выступает технология многопользовательской системы со множественным входом и множественным выходом (Multi-User Multiple-Input Multiple-Output, MU-MIMO), обеспечивающая пространственное мультиплексирование пользователей в едином частотно-временном ресурсе. Однако пропускная способность систем MU-MIMO фундаментально ограничена внутрисистемной

многопользовательской интерференцией (Multi-User Interference, MUI) [1].

Для минимизации MUI на передающей стороне применяются стратегии прекодирования, которые классифицируются на линейные и нелинейные. Линейные методы [2], такие как принудительное обнуление помех (Zero-Forcing, ZF) и линейное прекодирование с минимальной среднеквадратической ошибкой, доминируют в практических реализациях благодаря низкой вычислительной сложности. Тем не менее, их эффективность критически зависит от ортогональности каналов. В реалистичных условиях распространения радиоволн, характеризующихся пространственной корреляцией антенных элементов, канальная матрица становится плохо обусловленной. В таких сценариях применение линейного прекодирования приводит к значительному усилению шума, что вызывает деградацию качества обслуживания.

С другой стороны, нелинейные методы [3], такие как прекодирование Томлинсона–Харашимы (Tomlinson–Harashita Precoding, THP), являющееся субоптимальной реализацией теоретического подхода «кодирования с грязной бумагой». THP позволяет эффективно устранять интерференцию даже в сильно коррелированных каналах без существенного усиления шума. Однако алгоритм требует выполнения матричных разложений для каждой поднесущей, что накладывает запретительно высокую вычислительную нагрузку, особенно при масштабировании числа антенн.

Таким образом, существует проблема оптимизации: использование фиксированного алгоритма прекодирования неэффективно в условиях стохастической изменчивости канала. Целью настоящей работы является разработка адаптивного алгоритма гибридного прекодирования, способного динамически выбирать стратегию обработки сигнала на основе метрики мгновенного состояния канала. В качестве критерия переключения предложено использовать число обусловленности канальной матрицы.

Для достижения поставленной цели в статье решены следующие задачи:

- Разработана математическая модель системы MU-MIMO с учетом пространственной корреляции антенн;

- Проведен сравнительный анализ эффективности алгоритмов ZF и THP в зависимости от обусловленности канала;
- Синтезирован алгоритм адаптивного переключения с применением сглаживающей функции активации;
- Выполнено имитационное моделирование предложенного решения и оценка вероятности битовой ошибки (Bit Error Rate, BER) в различных сценариях соотношения сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR).

A. Модель системы и канала связи

Рассматривается нисходящий канал системы беспроводной связи MU-MIMO, совмещенной с технологией ортогонального частотного уплотнения (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), в которой базовая станция, оборудованная N_T передающими антеннами, обслуживает N_U одноантенных абонентских терминалов ($N_T \geq N_U$). Математическая модель сигнала рассматривается в частотной области после выполнения процедур OFDM-демодуляции на приемной стороне. Для k -й поднесущей вектор принятого сигнала $\mathbf{y}_k \in \mathbb{C}^{N_U \times 1}$ описывается уравнением:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k,$$

где $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N_U \times N_T}$ – матрица канала на k -й поднесущей; $\mathbf{x}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ – вектор прекодированного сигнала, передаваемого базовой станцией; $\mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{N_U \times 1}$ – вектор аддитивного белого гауссовского шума, компоненты которого являются независимыми случайными величинами с нулевым средним и дисперсией.

B. Модель канала с пространственной корреляцией

Для анализа эффективности алгоритмов в условиях приближенных к реальным, используется модель частотно-селективных замираний с учетом пространственной корреляции на передающей стороне. Данный эффект возникает вследствие недостаточного углового разнесения антенных элементов или ограниченного локального рассеяния вблизи базовой станции. Матрица канала \mathbf{H}_k с учетом пространственной корреляции моделируется с использованием модели Кронекера [4]:

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{H}_{w,k} \mathbf{R}_T^{1/2},$$

где $\mathbf{H}_{w,k} \in \mathbb{C}^{N_U \times N_T}$ – матрица, элементы которой являются независимыми и одинаково распределенными комплексными гауссовскими случайными величинами, моделирующими базовые замирания канала; $\mathbf{R}_T \in \mathbb{C}^{N_T \times N_T}$ – матрица пространственной корреляции передатчика. Структура матрицы \mathbf{R}_T аппроксимируется экспоненциальной моделью, где элементы $[\mathbf{R}_T]_{i,j}$ определяются коэффициентом корреляции ρ ($0 \leq \rho < 1$) между соседними антеннами:

$$[\mathbf{R}_T]_{i,j} = \rho^{|i-j|}.$$

Варьирование параметра ρ позволяет моделировать широкий спектр сценариев распространения: от канала с независимыми замираниями ($\rho \rightarrow 0$) до сильно коррелированного канала ($\rho \rightarrow 1$). Следует отметить, что при $\rho \rightarrow 1$ столбцы матрицы \mathbf{H}_k становятся линейно зависимыми, что ведет к резкому росту числа обусловленности $\kappa(\mathbf{H}_k)$. Высокое значение $\kappa(\mathbf{H}_k)$ свидетельствует о плохой обусловленности канала, при которой применение классических линейных методов становится энергетически неэффективным из-за эффекта усиления шума, что обосновывает целесообразность применения гибридных подходов.

C. Линейное прекодирование методом ZF

Метод ZF является классическим алгоритмом линейного прекодирования, целью которого является полная декорреляция пространственных потоков путем формирования диаграммы направленности в нулевые зоны нецелевых пользователей. Для k -й поднесущей матрица весовых коэффициентов $\mathbf{W}_{ZF,k} \in \mathbb{C}^{N_T \times N_U}$ формируется как [5]:

$$\mathbf{W}_{ZF,k} = \mathbf{H}_k^H (\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H)^{-1}. \quad (1)$$

Преимуществом данного метода является низкая вычислительная сложность. Однако его применимость фундаментально ограничена в сценариях с высокой пространственной корреляцией. Как было показано, наличие корреляции приводит к плохой обусловленности матрицы Грама $\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H$. При вычислении обратной матрицы в выражении (1) это вызывает неконтролируемый рост евклидовых норм векторов прекодирования. Для соблюдения ограничения на общую излучаемую мощность базовой станции необходимо применять коэффициент нормировки, стремящийся к нулю. Это приводит к эффекту усиления шума: полезная мощность сигнала на приемной стороне критически снижается относительно уровня теплового шума, что влечет за собой резкую деградацию выходного SNR и рост BER.

D. Нелинейное прекодирование THP

Для преодоления проблемы усиления шума применяется нелинейный алгоритм THP. В отличие от ZF THP устраняет интерференцию последовательно без инверсии канальной матрицы, что позволяет избежать эффекта усиления шума. Математическая основа метода базируется на основе LQ-разложения матрицы канала для каждой поднесущей k . В практической реализации используется QR-разложение эрмитово-сопряженной матрицы канала \mathbf{H}_k^H : $\mathbf{H}_k^H = \mathbf{Q}_k \mathbf{R}_k$, где $\mathbf{Q}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times N_T}$ – унитарная матрица, а $\mathbf{R}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times N_U}$ – верхняя треугольная матрица. Следовательно, исходная матрица канала может быть представлена как:

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{R}_k^H \mathbf{Q}_k^H = \mathbf{L}_k \mathbf{F}_k^H,$$

где $\mathbf{L}_k = \mathbf{R}_k^H$ – нижняя треугольная матрица; $\mathbf{F}_k = \mathbf{Q}_k$ – матрица фильтра прямой связи.

Передаваемый сигнал \mathbf{x}_k формируется как: $\mathbf{x}_k = \mathbf{F}_k \mathbf{v}_k$, где \mathbf{v}_k – вспомогательный вектор, элементы которого вычисляются рекурсивно для устранения интерференции от предыдущих пользователей. Для m -го пользователя на поднесущей k символ $v_{m,k}$ вычисляется следующим образом:

$$v_{m,k} = \mathcal{M} \left(s_{m,k} - \sum_{n=1}^{m-1} \frac{l_{m,n}}{l_{m,m}} v_{n,k} \right)$$

где $s_{m,k}$ – информационный символ; $l_{m,n}$ – элемент матрицы \mathbf{L}_k ; $\mathcal{M}(\cdot)$ – оператор взятия по модулю, ограничивающий амплитуду сигнала для сохранения средней мощности передачи.

Ключевым преимуществом ТНР является использование унитарной матрицы прекодирования \mathbf{F}_k , которая сохраняет евклидову норму вектора сигнала, предотвращая энергетические потери. Однако реализация данного метода требует выполнения операции матричного разложения для каждого частотного ресурса k в каждом временном слоте. Это создает вычислительную сложность порядка $\mathcal{O}(N_T^3)$ на поднесущую, что делает использование ТНР избыточным в сценариях с благоприятной обусловленностью канала [6].

Е. Разработка адаптивного алгоритма гибридного прекодирования

Основной вклад данной работы заключается в разработке гибридной архитектуры, динамически адаптирующей стратегию обработки сигнала к мгновенному состоянию канала. Критическим аспектом проектирования является выбор метрики, инвариантной к мощности сигнала, но чувствительной к линейной зависимости пространственных каналов. В качестве такой метрики выбрано число обусловленности евклидовой нормы канальной матрицы $\kappa(\mathbf{H}_k)$. На основе сингулярного разложения матрицы канала, $\kappa(\mathbf{H}_k)$ определяется как отношение максимального

$$\text{сингулярного числа к минимальному: } \kappa(\mathbf{H}_k) = \frac{\sigma_{max,k}}{\sigma_{min,k}}.$$

Использование жесткого порогового критерия для переключения режимов может привести к неустойчивости системы при флуктуациях параметров канала вблизи порогового значения. Для обеспечения гистерезиса и устойчивости управления предлагается механизм плавного взвешивания с использованием логистической (сигмоидальной) функции активации. Весовой коэффициент $w_k \in (0,1)$, интерпретируемый как степень предпочтения режима ТНР, рассчитывается по формуле:

$$w_k = \frac{1}{1 + \exp(-s \cdot (\kappa(\mathbf{H}_k) - \kappa_{th}))},$$

где κ_{th} – пороговое значение числа обусловленности, определяемое эмпирически исходя из допустимого уровня усиления шума; s – параметр крутизны,

регулирующий чувствительность алгоритма в переходной области.

Сигмоидальная функция выполняет роль низкочастотного фильтра решений, сглаживая стохастические выбросы в оценке канала. Окончательное принятие решения о выборе режима прекодирования для k -й поднесущей реализуется через бинарный селектор:

- Если $w_k < 0,5$: выбирается ZF (доминирует устойчивость канала);
- Если $w_k \geq 0,5$: выбирается ТНР (доминирует риск усиления шума).

Результаты моделирования

Для верификации предложенного адаптивного алгоритма и сравнительного анализа его эффективности с традиционными методами (ZF и ТНР) было проведено имитационное моделирование методом Монте-Карло. Основные параметры, использованные в моделировании, приведены в табл. I.

ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Категория	Параметр	Значение
Системная конфигурация	Антенная конфигурация ($N_T \times N_U$)	8×4
	Тип модуляции	QPSK
Параметры OFDM	Общее число поднесущих	64
	Длина циклического префикса	16
	Число информационных поднесущих	52
Модель канала	Тип замираний	Райса (К-фактор=3) Рэля
	ρ	0,75
Алгоритм адаптации	Порог переключения κ_{th}	15
	Параметр крутизны сигмоиды s	0,8

На рисунке 1 представлены графики зависимости BER от SNR для трех исследуемых алгоритмов: традиционного линейного прекодирования (ZF), нелинейного прекодирования (ТНР) и предлагаемого адаптивного гибридного алгоритма (Hybrid ZF+ТНР). Сравнение проводилось для двух сценариев распространения радиоволн: канала Райса (рис. 1а) и канала Рэля (рис. 1б).

Для детального изучения поведения предложенного алгоритма на рис. 2 представлены тепловые карты, иллюстрирующие значения весового коэффициента w_k для каждой из 52 поднесущих данных в диапазоне моделируемых значений SNR. Цветовая шкала отображает режим работы: темно-синий цвет ($w_k \rightarrow 0$) соответствует режиму ZF, желтый цвет ($w_k \rightarrow 1$) – режиму ТНР, а промежуточные оттенки указывают на переходную область мягкого переключения.

Обсуждение полученных результатов

Анализ результатов моделирования подтверждает, что предложенный критерий переключения на основе числа обусловленности обеспечивает корректную адаптацию системы к физике канала.

Во-первых, наблюдается четкая корреляция между структурой канала и выбором алгоритма. В канале Райса

(рис. 1а, рис. 2а) наличие доминирующего компонента прямой видимости приводит к линейной зависимости столбцов матрицы канала и, как следствие, к критически малым значениям минимального сингулярного числа. Алгоритм правильно идентифицирует это состояние как плохо обусловленное и принудительно активирует режим THP, предотвращая катастрофическое усиление шума, свойственное ZF. Напротив, в канале Рэя (рис. 1б, 2б) эффект многолучевого рассеяния обеспечивает статистическую независимость элементов канала, что улучшает пространственное разделение и позволяет алгоритму чаще использовать вычислительно эффективный метод ZF.

Во-вторых, детальное понимание механизма селекции дает анализ тепловых карт распределения весовых коэффициентов (рис. 2), визуализирующих стратегию использования частотного ресурса. Наличие горизонтальных зон режима ZF, сохраняющихся во всем диапазоне SNR, доказывает, что гибридный алгоритм не работает вслепую, а использует преимущества частотно-селективных замираний. Он оппортунистически применяет простой алгоритм ZF на тех поднесущих, где условия интерференции благоприятны, оптимизируя вычислительный ресурс без ущерба для помехоустойчивости.

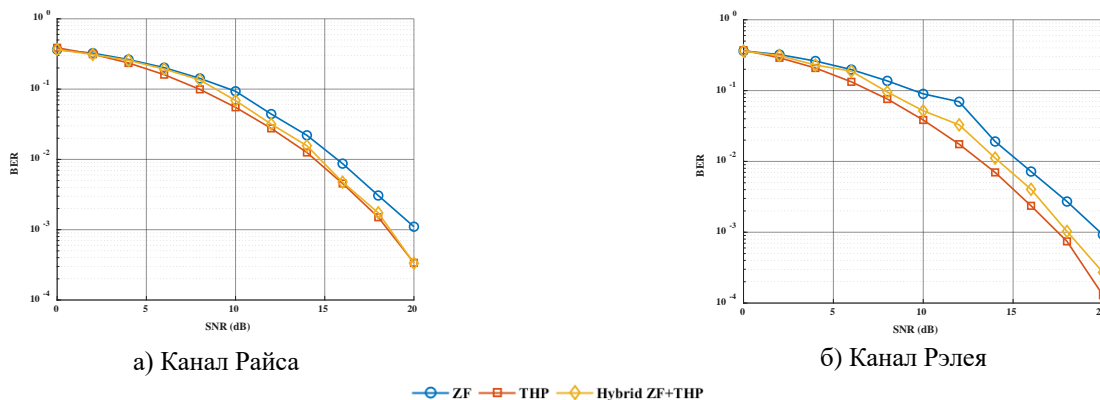


Рис. 1. Зависимость BER от SNR для различных алгоритмов прекодирования: а) в канале Райса; б) в канале Рэя

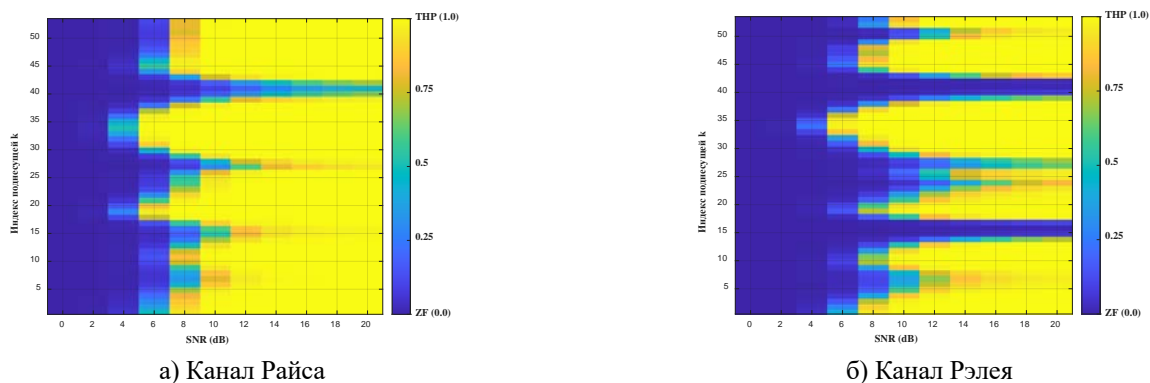


Рис. 2. Тепловая карта распределения весовых коэффициентов переключения в зависимости от SNR и индекса поднесущей

II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена задача повышения эффективности систем MU-MIMO-OFDM в условиях пространственной корреляции каналов путем синтеза алгоритма адаптивного гибридного прекодирования. Результаты имитационного моделирования подтвердили, что использование числа обусловленности канальной матрицы в качестве метрики переключения позволяет достичь квазиоптимального баланса характеристик. Полученные результаты обосновывают перспективность внедрения разработанного подхода в цифровые процессоры базовых станций сетей 5G и последующих поколений, где критически важна адаптация к нестационарным условиям радиосреды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Крейнделлин В.Б., Смирнов А.Э., Бен Режеб Т.Б.К. Эффективность методов обработки сигналов в системах MU-MIMO высоких порядков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10, № 12. С. 24–30.

[2] Subitha D., Vani R. Analysis of Linear Precoding Techniques for Massive MIMO-OFDM Systems under various scenarios // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1084. 012053. DOI: 10.1088/1757-899X/1084/1/012053.

[3] Zu K., De Lamare R.C., Haardt M. Multi-Branch Tomlinson-Harashima Precoding Design for MU-MIMO Systems: Theory and Algorithms // IEEE Transactions on Communications. 2014. Vol. 62, No. 3. P. 981–995. DOI: 10.1109/TCOMM.2014.012514.130241.

[4] McNamara D.P., Beach M.A., Fletcher P.N. Spatial correlation in indoor MIMO channels // Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Lisbon: IEEE, 2002. Vol. 1. P. 290–294. DOI: 10.1109/PIMRC.2002.1046707.

[5] Калачиков А.А. Анализ характеристик алгоритмов прекодирования сигналов в системе MU-MIMO с группированием абонентов // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9, № 2. С. 65–71. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-2-65-71.

[6] Wang L., Rui G. An improved Tomlinson-Harashima Precoding based on lattice reduction for MIMO two-way relay systems // 2014 XXXI-th URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). Beijing: IEEE, 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/URSIGASS.2014.6929315.