

Научная статья

УДК 621.391

DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-7-14



# Численное моделирование прекодирования ZF и оптимального прекодирования в канале MU-MISO при задержках информации о канале

Александр Александрович Калачиков ✉, 330rts@gmail.com

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
Новосибирск, 630102, Российская Федерация

**Аннотация:** В статье рассматривается влияние задержек измеренного состояния канала, вызванное перемещением абонентов и эффектом его старения, на характеристики прекодирования в многопользовательской системе MISO в нисходящем направлении. Рассматриваются алгоритмы прекодирования – метод обнуления интерференции (ZF) и метод, основанный на численной оптимизации для вычисления весовых векторов прекодирования с целью повышения суммарной спектральной эффективности многопользовательской системы. Для проведения численного моделирования используется пакет моделирования радиоканала QuaDRiGa, позволяющий получить необходимый объем реализаций канала MISO при перемещении абонентов с различной скоростью. Сравнение полученных характеристик прекодирования сравниваемых алгоритмов в канале с перемещением абонентов и наличием пространственной корреляции выполняется на основе функции распределения средней спектральной эффективности по множеству пользователей.

**Ключевые слова:** многопользовательская система MU-MISO, пространственное мультиплексирование, модель канала MISO, устаревание канала, прекодирование MU-MISO, спектральная эффективность

**Ссылка для цитирования:** Калачиков А.А. Численное моделирование прекодирования ZF и оптимального прекодирования в канале MU-MISO при задержках информации состояния // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 2. С. 7–14. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-7-14. EDN:UUVIZN

## Numtrical Evaluation of Optimal Precoding Algorithm and Zero Forcing Precoding in MU-MISO Channel with Channel Aging

Alexander Kalachikov ✉, 330rts@gmail.com

Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences,  
Novosibirsk, 630102, Russian Federation

**Abstract:** In paper the numerical investigation of the impact of delayed channel state information (CSI) due to user movement and caused channel aging on the performance of multiuser precoder in downlink MISO system. The time variant CSI is obtained by the least squares channel estimation. We consider Zero Forcing algorithm and numerical optimization based solution of calculating precoder vectors maximizing sum rate of multiuser system. For numerical simulation the QuaDRiGa channel model reflecting the real propagation conditions for moving users is used. The obtained performance of multiuser Zero Forcing and optimization based beamforming in spatially correlated channel are compared based on the empirical cumulative density function of the sum rate of multiple users.

**Keywords:** *multiuser precoding, QUADRIGA 3GPP channel model, ZF precoding, optimal precoding design, channel aging*

**For citation:** Kalachikov A. Numtrical Evaluation of Optimal Precoding Algorithm and Zero Forcing Precoding in MU-MISO Channel with Channel Aging. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(2):7–14. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-7-14. EDN:UUVIZN

## Введение

Применение многоантенных систем MIMO позволяет повысить спектральную эффективность и получить выигрыш от пространственного мультиплексирования в многопользовательских системах MU-MISO при использовании соответствующего формирования сигналов на основе прекодирования. Основной выигрыш от применения прекодирования в системах MIMO зависит от текущих условий распространения сигналов в канале и от точности измерения информации о состоянии канала (CSI, аббр. от англ. Channel State Information) на стороне базовой станции (БС) при вычислении весовых векторов прекодирования.

Точная и актуальная CSI в виде оценки канала очень важна для задач прекодирования в нисходящем (DL, аббр. от англ. Downlink) направлении и для комбинирования сигналов абонентов в восходящем (UL, аббр. от англ. Uplink) направлении. В системе связи OFDM (аббр. от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) с перемещением абонентов быстрое изменение состояния канала может произойти за несколько передаваемых символов. Для мобильных пользователей импульсная характеристика канала меняется во времени, и интервал когерентности снижается.

Обработка сигналов на стороне БС, включающая в себя оценивание канала по пилот-сигналам, распределение ресурсов системы, вычисление векторов прекодирования вызывает задержки, способные превысить время когерентности канала, интервал времени, после которого оценка канала CSI является неактуальной, устаревшей.

Отличие состояния канала (импульсной или частотной характеристики), полученного при его оценке, по которой производится вычисление весовых векторов прекодирования, от его реальной текущей импульсной характеристики называют старением канала (от англ. Channel Aging). Уже на средней скорости перемещения абонентов (порядка 30 км/ч) характеристики системы снижаются на 50 % по сравнению с малоподвижными абонентами [1, 2]. Поэтому изучение влияния старения канала на характеристики системы связи является важным для правильной конфигурации параметров сигнала многопользовательской системы связи.

Модель канала при наличии эффекта его старения рассмотрена в предположении, что: автокорреляционная функция канала во времени описывается

моделью Джейкса – Кларка, а смещение Доплера приводит к тому, что импульсная характеристика канала описывается функцией Бесселя первого рода нулевого порядка [3]. Но реальные каналы описываются ограниченным угловым рассеянием многолучевых компонент, и на практике временная корреляция отличается от модели Джейкса – Кларка. Для численного моделирования алгоритмов обработки сигналов и оценивания канала при наличии старения канала необходимо использовать модель канала связи, отображающую реальные условия распространения при неравномерном рассеянии и наличии пространственной корреляции.

В первом разделе проводится изучение влияния эффекта старения канала на характеристики прекодирования в многопользовательской нисходящей системе MISO для пользователей на транспортных средствах в реалистичных условиях распространения сигнала и пространственно-коррелированных каналах связи. Описываются параметры канала со старением, которые используются в разделе моделирования. Для оценки влияния эффекта старения используется имитационное моделирование на основе модели канала с открытым кодом, реализующим принцип геометрического вероятностного моделирования условий распространения. Во втором разделе представлены результаты моделирования и их сравнительный анализ.

## 1. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМОВ

### 1.1. Модель системы

Рассматриваемая система состоит из БС (оборудованной многоэлементной антенной из  $N_T$  элементов и мощности передатчика  $P$ ), и  $K$  мобильных пользователей, каждый из которых оборудован одной антенной. Канал каждого пользователя описывается набором коэффициентов в виде вектора  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ .

Передаваемые символы на многоэлементной антенне на каждом символьном интервале  $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$  составляются в виде:

$$\mathbf{X} = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k s_k,$$

где  $s_k$  – передаваемый информационный символ пользователя  $k$ ;  $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$  – вектор прекодирования пользователя  $k$ .

Принятый сигнал пользователя  $k$  на поднесущей с номером  $sk$  и номером символа  $n$  выражается в виде:

$$y_{k,n,sk} = \mathbf{h}_{k,n,sk}^T \mathbf{X}_{n,sk} + n_{k,n,sk} \text{ для } k = 1, \dots, K. \quad (1)$$

где  $n_{k,n,sk}$  – комплексный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma_k^2$ .

Матрица канала MU-MIMO состоит из векторов каналов пользователей:

$$\mathbf{H}_{n,s} = [\mathbf{h}_{1,n,sk} \dots \mathbf{h}_{K,n,sk}]^T,$$

и вектор принятых символов от  $K$  пользователей на стороне БС определяется как:

$$\mathbf{y}_{n,sk} = \mathbf{H}_{n,sk}^T \mathbf{X}_{n,sk} + n_{n,sk}. \quad (2)$$

Принятый скалярный сигнал для подвижного абонента с номером  $k$  с использованием векторов прекодирования определяется в виде:

$$y_k = \mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k s_k + \sum_{j \neq k} \mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_j s_j + \mathbf{n}_k \text{ для } k = 1, \quad (3)$$

где слагаемое в виде суммы соответствует сигналам интерференции, возникающим при передаче данных пользователей, использующих тот же частотно-временной ресурс системы [4].

В качестве показателя эффективности в системах мобильной связи используется величина спектральной эффективности. Для многопользовательских систем MU-MIMO спектральная эффективность по совокупности пользователей вычисляется как сумма спектральных эффективностей по всем пользователям по всем поднесущим и зависит от отношения сигнал/(шум + интерференция) – SINR (аббр. от англ. Signal to Interference + Noise Ratio) Величина SINR пользователя  $k$  вычисляется по выражению:

$$SINR_k = \frac{|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j \neq k} |\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_j|^2 + K \sigma^2 / P}. \quad (4)$$

Выражение для спектральной эффективности по всем пользователям записывается в виде:

$$R_{BF} = \sum_{k=1}^K (\log_2(1 + SINR_k)) \text{ [бит/с/Гц]}.$$

### 1.2. Устаревание канала

Из-за передвижения мобильных абонентов возникает временное изменение условий распространения, которое оказывает влияние на свойства канала в пределах ресурсного слота системы. Измеренная частотная характеристика канала устаревает за это время, канал изменяется к моменту, когда измеренная частотная характеристика используется для вычисления весовых коэффициентов

прекодирования, что снижает спектральную эффективность системы вследствие слабого подавления интерференции между пользователями.

Для анализа свойств алгоритмов прекодирования и оценивания системных параметров требуется модель канала, которая описывает временную и пространственную корреляцию коэффициентов канала, которые изменяются во времени.

Вектор канала  $\mathbf{h}_k[n]$  для пользователя  $k$  в момент времени  $n$  описывается как функция его начального состояния  $\mathbf{h}_k[0]$  и инновационной компоненты в виде:

$$\mathbf{h}_k[n] = \rho_k[n] \mathbf{h}_k[0] + \bar{\rho}_k[n] \mathbf{g}_k[n], \quad (5)$$

где индекс времени 0 соответствует последнему символу, переданному в период оценивания канала;  $\mathbf{g}_k[n]$  – независимый инновационный компонент в момент времени  $n$ ;  $\rho_k[n]$  – коэффициент корреляции вектора канала между реализациями канала в момент времени 0 и  $n$ ;  $\bar{\rho}_k[n] = \sqrt{1 - \rho_k^2[n]}$ .

Для изотропных условий рассеяния  $\rho_k[n]$  соответствует:

$$\rho_k[n] = J_0(2\pi f_D T_s n),$$

где  $J_0(\cdot)$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $T_s$  – интервал дискретизации (длительность символа OFDM);  $f_D$  – максимальный частотный сдвиг Доплера для пользователя со скоростью  $v$  и центральной частотой  $f_c$ .

Разница между текущим вектором канала  $\mathbf{h}_k[n]$  и частью  $\rho_k[n] \mathbf{h}_k[0]$  может рассматриваться как ошибка аппроксимации, проводящая к снижению эффективности прекодирования при подавлении интерференции между пользователями [5].

### 1.3. Оценивание канала по методу наименьших квадратов

Вычисление весовых векторов прекодирования требует точного знания информации о состоянии канала, которая определяется на стороне БС по входящему сигналу абонента, предполагая, что система функционирует в режиме временного разделения (TDD, аббр. от англ. Time Division Duplex) на основе обратимости свойств канала для UL и DL направлений.

Оценивание канала по методу наименьших квадратов (LS, аббр. от англ. Least Squares) выполняется на поднесущих пилот-сигналов в частотной области, используя сформированные последовательно зондирующие опорных сигналов (SRS, аббр. от англ. Sounding Reference Signal), которые равномерно распределяются по поднесущим сигнала для всех пользователей. Оценка канала на каждой поднесущей с пилот-сигналами для переданного  $X[m]$  и принятого  $Y[m]$  символов вычисляется по выражению:

$$\hat{H}_{LS}[m] = \frac{Y[m]}{X[m]}, m = 0, \dots, M-1.$$

Среднеквадратическая ошибка (MSE, аббр. от англ. Mean Squared Error) LS-оценки канала вычисляется как:

$$MSE_{LS} = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_x^2}$$

и обратно пропорциональна отношению сигнал/шум [6] в канале.

#### 1.4. Прекодирование по алгоритму ZF

Весовые векторы прекодирования вычисляются по алгоритму обнуления сигналов интерференции (ZF, аббр. от англ. Zero-Forcing) с учетом текущих условий распространения сигналов, и применяются в целях снижения взаимной интерференции между сигналами пользователей, разделяющими частотно-временной ресурс системы связи. Вектор прекодирования ZF  $\mathbf{w}_k$  пользователя  $k$  вычисляется, исходя из требования ортогональности векторам каналов остальных пользователей  $\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_j = 0$  для  $j \neq k$ . На каждой поднесущей сигнала OFDM происходит оценивание матрицы канала  $\mathbf{H}_{n,sk}$  для ее использования при вычислении матрицы прекодирования по выражению:  $\mathbf{w}_{ZF} = \mathbf{H}(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$  [7].

#### 1.5. Вычисление векторов прекодирования на основе численной оптимизации

Характеристики прекодирования ZF для быстро перемещающихся абонентов в случае задержки оценки канала не являются оптимальными. Поиск оптимальных весовых векторов прекодирования может быть сформулирован как задача выпуклого программирования второго порядка с целью определения стационарных точек. Целью является нахождение весовых коэффициентов  $\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K$ , которые максимизируют суммарную спектральную эффективность  $R_{BF}$  в зависимости от величин отношения сигнал/шум пользователей  $SINR_k$  при ограничении мощности передатчика БС:

$$\max_{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K \in \mathbb{C}^{Nt}} R_{BF} \quad (6)$$

с учетом ограничений  $\sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 < P$ .

Целевая функция  $R_{BF}$  зависит от значений величин SINR пользователей, которые являются невыпуклыми функциями векторов прекодирования  $(\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K)$ . Поиск весовых векторов прекодирования может быть сформулирован как проблема минимизации общей мощности передатчика с учетом ограничений на SINR пользователей  $\gamma_k$  у каждого из  $K$  абонентов. Величины  $\gamma_k$  являются минимальными допустимыми значениями SINR для пользователя  $k$ . Соответствующая задача минимизации формулируется в следующем виде:

$$\min_{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K \in \mathbb{C}^{Nt}} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 \quad (7)$$

с учетом ограничений  $SINR_k \geq \gamma_k$ .

Решение этой задачи составляют весовые векторы, которые позволяют достичь требуемых величин SINR, используя минимизацию мощности передатчика. Она может быть переформулирована как задача выпуклой оптимизации.

Ограничения  $SINR_k \geq \gamma_k$  можно записать как:

$$|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k|^2 \geq \gamma_k \sum_{j \neq k} |\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_j|^2 + \gamma_k \sigma^2. \quad (8)$$

Скалярное произведение  $\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k$  должно быть реальным и положительным  $Im(\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k) = 0$ . Записанное в таком виде ограничение SINR является ограничением второго порядка [8, 9].

Задача оптимизации может быть эффективно решена с использованием программной реализации методов выпуклой оптимизации, например, при помощи пакета CVX.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 2.1. Модель канала QuaDRiGa

Моделирование алгоритмов прекодирования выполняется с использованием программной реализации модели канала [10]. Для определения характеристик прекодирования MU-MISO в практических сценариях развертывания используется модель канала 5G NR. Модель канала с открытым исходным кодом QuaDRiGa соответствует стандарту 3GPP, позволяет выполнять моделирование в типовых условиях распространения при различной скорости и траектории перемещения абонентов; для чего она параметризуется в соответствии с необходимым сценарием развертывания сети. Параметры крупномасштабных и мелкомасштабных замираний генерируются вероятностным методом для каждой траектории перемещения абонента [11, 12].

Параметры канала с многолучевым распространением генерируются для каждого пользователя в соответствии с распределением рассеивателей в пространстве. Полученные коэффициенты канала имеют единые пространственные и временные характеристики с данными измерений, использованными в качестве параметров модели.

### 2.2. Результаты моделирования алгоритмов ZF и метода на основе оптимизации

В данном разделе приводятся результаты численного моделирования алгоритмов прекодирования и определения спектральной эффективности при наличии устаревания канала. Сравнение характеристик прекодеров выполняется на основе функции распределения эргодической суммарной спектральной эффективности. Задача оптимизации ре-

шалась при помощи пакета программ выпуклой оптимизации CVX [13]. Ниже представлены результаты моделирования канала, влияние перемещения абонентов на устаревание канала и эффективность прекодирования по критерию их суммарной спектральной эффективности. Моделирование является продолжением изучения свойств алгоритмов прекодирования [14, 15]. Параметры модели канала в пакете QuaDRiGa приведены в таблице 1.

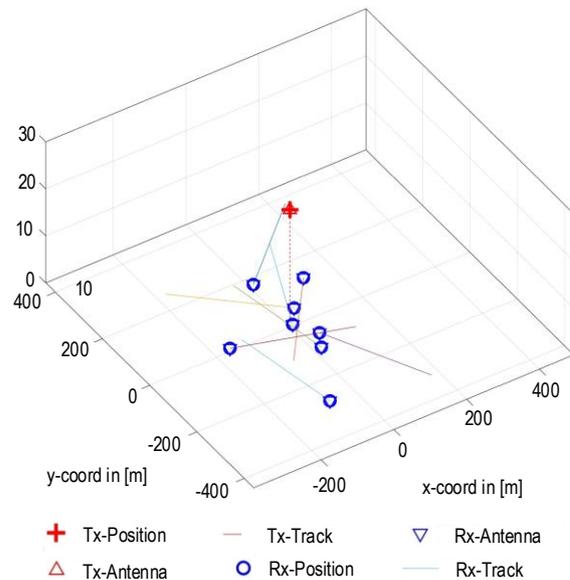
**ТАБЛИЦА 1. Параметры модели**  
TABLE 1. Simulation Parameters

Параметр модели	Значение
Версия модели канала	QuaDRiGa v.2.2
Сценарий развертывания	3GPP Berlin UMa NLoS
Количество многолучевых составляющих	47
Центральная частота системы	4,5 ГГц
Полоса частот системы	20 МГц
Количество антенн БС	4, 8, 16
Скорость перемещения абонентов	30, 60 км/ч
Количество абонентов	8

Характеристики прекодирования ZF и на основе численной оптимизации оценивались на уровне системного моделирования по критерию средней спектральной эффективности. На рисунке 1 показано распределение абонентов и траектории их движения для каждого пользователя на линейном интервале 300 м. Размер сценария определяется параметром моделирования. В данном случае выбран параметр 3GPP Berlin UMa NLoS – UMa (аббр. от англ. Urban Macrocell) – городская макросота; параметры модели были получены при измерениях распространения в городской застройке Берлина. На рисунке указано положение БС, высота установки антенны – 25 м, начальные положение – 8 абонентов распределены случайно по обслуживаемой территории. Также указаны траектории движения абонентов.

В качестве исходных параметров моделирования указывается тип антенны, количество элементов и ее пространственное расположение. Коэффициенты канала генерируются на основе исходного расположения БС и абонентов, а также сценария развертывания сети. По методике вероятностного геометрического моделирования происходит генерация параметров модели, определяющих крупномасштабные свойства канала – рассеяние задержек путей распространения, угловое рассеяние путей, наличие прямой видимости между БС и антеннами абонентов. После этого генерируются коррелированные в пространстве величины задержек и углов приема отдельных путей распространения.

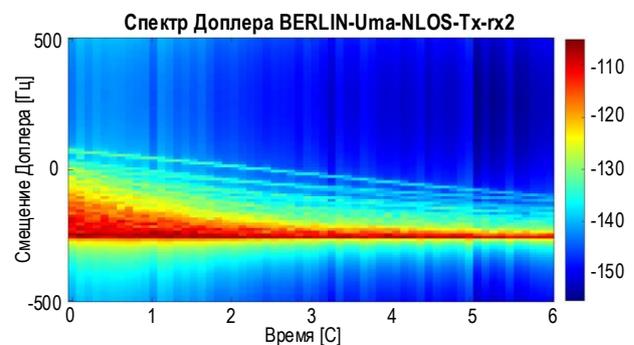
Потери распространения и затенение были заблокированы при моделировании, и узкополосные векторы каналов нормировались для выбранной поднесущей к единичной мощности. БС оборудована антенной из 16 элементов, количество обслуживаемых пользователей  $K = 8$ , и каждый пользователь оборудован одной антенной. Центральная частота системы выбрана 4,5 ГГц. Для каждого пользователя определяется линейная траектория движения с заданной скоростью. На указанной траектории во всех экспериментах формируется примерно 12 000 реализаций импульсных характеристик канала на скорости 30 км/ч и около 6 000 – на скорости 60 км/ч.



**Рис. 1. Распределение абонентов и траектории перемещения в сценарии BERLIN UMa NLoS**

Fig. 1. Spatial Distribution of Users and Moving Tracks in BERLIN UMa NLoS Scenario

На рисунке 2 показан спектр Доплера для выбранного пользователя на скорости 60 км/ч. Для канала между БС и абонентом 2 смещение Доплера составляет 250 Гц. Полученные реализации канала для каждого пользователя и передающей антенны состоят из многолучевых компонент.



**Рис. 2. Смещение спектра Доплера для выбранного абонента**

Fig. 2. Doppler Spectrum of the Channel of User 2

Частотная характеристика канала вычисляется по данным компонентам для полосы 20 МГц, разделенной на 512 поднесущих передаваемого сигнала. Для каждой поднесущей вычисляется вектор прекодирования по алгоритму ZF и по методу численной оптимизации.

### 2.3. Выбор интервала передачи символов с пилот-сигналами в пределах слота

Эффект устаревания канала необходимо учитывать при выборе соответствующего интервала повторения пилот-сигналов в пределах слота передачи. Оценка канала по пилот-сигналам в составе OFDM-символа используется для вычисления векторов прекодирования в последующих передаваемых символах слота. Задержка в применении измененного канала приводит к увеличению интерференции между пользователями, снижает SINR каждого и суммарную спектральную эффективность.

Для выбора интервала OFDM-символов, содержащих пилот-сигналы в пределах слота используется вычисление SINR пользователей на различных скоростях их движения с применением прекодирования ZF и прекодирования на основе оптимизации.

На рисунке 3 представлены значения DL SINR для двух скоростей пользователей на первых 60 индексах OFDM-символов. Первый символ соответствует положению OFDM-символа с пилот-сигналом, последующие – OFDM-символы передачи данных, используя полученные оценки канала на пилотных поднесущих для вычисления векторов прекодирования.

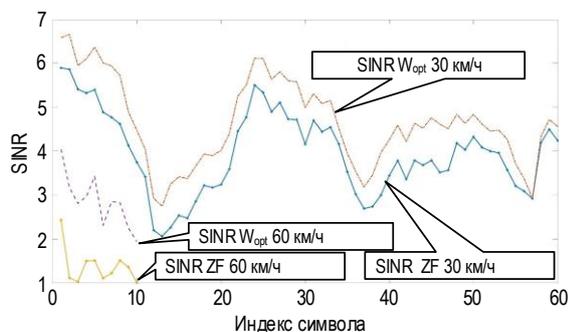


Рис. 3. Распределение SINR при устаревании канала

Fig. 3. Downlink SINR under Channel Aging

Соответствующие реализации канала MISO получены на основе пакета модели канала QuaDRiGa. Величина SINR вычислялась с использованием двух рассматриваемых методов прекодирования для всех пользователей. Колебательный характер значений SINR соответствует временной корреляции коэффициентов канала. Скорость обновления реализаций канала в модели  $T_s = 0,001$  с. При увеличении скорости пользователей нормированное смещение частоты Доплера  $F_D T_s$  увеличивается, интервал положения первого минимума SINR смещается влево. Значение индекса, соответствующее

первому минимуму, используется для выбора подходящего интервала размещения пилот-сигналов в слоте для снижения влияния устаревания канала.

### 2.4. Спектральная эффективность алгоритмов прекодирования ZF и алгоритма на основе численной оптимизации

Влияние ошибок оценивания канала представлено для случаев скорости абонента 30 и 60 км/ч при отношении сигнал/шум 18 дБ. На рисунке 4 представлены функции распределения спектральной эффективности для 8 пользователей на скоростях 30 и 60 км/ч.

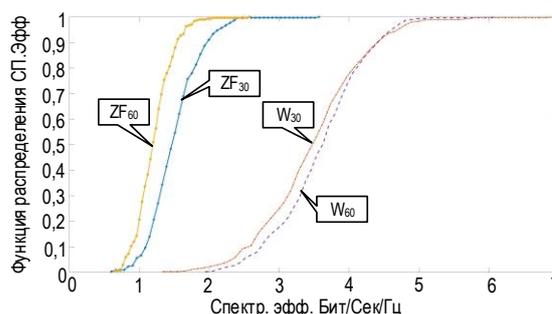


Рис. 4. Функция распределения спектральной эффективности прекодирования ZF и методом оптимизации

Fig. 4. CDF of Sum Rate for ZF Precoding and Optimization Based Precoding

При низких скоростях (около 30 км/ч) разница в характеристиках спектральной эффективности между алгоритмом ZF и численной оптимизацией заметна достаточно отчетливо, среднее значение спектральной эффективности ZF составляет 2,4 бит/с/Гц, а среднее значение спектральной эффективности прекодирования на основе численной оптимизации – 6,5 бит/с/Гц.

С увеличением скорости абонентов снижение характеристик прекодера ZF становится заметнее. На скорости 60 км/ч средняя спектральная эффективность для прекодера ZF составляет 2,1 бит/с/Гц; прекодера на основе численной оптимизации – 6,2 бит/с/Гц. Спектральная эффективность прекодера на основе оптимизации в 3 раза выше по сравнению с показателями прекодера ZF на скорости 60 км/ч, и при отношении сигнал/шум SNR = 18 дБ.

Отличие спектральных эффективностей при разных скоростях движения абонентов можно объяснить влиянием пространственной корреляции на эффект старения канала. При меньшей скорости перемещения меньше угловое рассеяние многолучевых компонент, выше пространственная корреляция в канале – что снижает эффект старения канала. Но увеличение пространственной корреляции приводит к увеличению взаимной интерференции между пользователями и к снижению спектральной эффективности прекодирования.

На рисунке 5 показана зависимость средней спектральной эффективности от SNR для 2-х способов прекодирования на скоростях 30 и 60 км/ч для 8 пользователей системы и 16 антеннах на БС. Выигрыш в характеристике метода вычисления весовых коэффициентов на основе численной оптимизации заметен на всем диапазоне SNR.

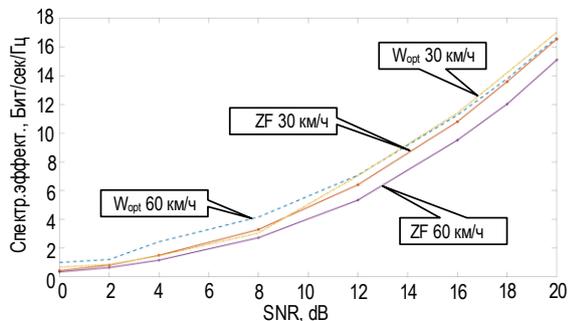


Рис. 5. Зависимость средней спектральной эффективности от отношения сигнал/шум

Fig. 5. Sum Rate vs SNR

## 2.5. Заключение

При перемещении абонентов и быстром изменении условий распространения на характеристики прекодирования влияет эффект устаревания ка-

нала. Данный эффект проявляется в снижении подавления интерференции между пользователями и снижении спектральной эффективности системы. Используя полученные характеристики изменения SINR для последовательных OFDM-символов, можно выбрать подходящий интервал оценивания канала по пилот-сигналам, выбирая этот интервал по первому минимуму зависимости SINR. Результаты показывают, что применение методов численной оптимизации позволяет получить кодовые вектора прекодирования с характеристиками, превышающими характеристики алгоритма прекодирования ZF для абонентов на транспортных средствах.

Дальнейшее направление работы состоит в изучении свойств указанных алгоритмов прекодирования с использованием планарных антенных решеток большей размерности (Massive MIMO) с антенных элементов с практическими диаграммами направленности, свойств алгоритмов оценки канала, более полно использующих пространственно-временную структуру канала для получения эффективной информации о канале в условиях его устаревания. Также необходимо рассмотреть практически важные алгоритмы прекодирования на основе кодовых книг различной пространственной размерности.

## Список источников

1. Truong K.T., Heath R.W. Effects of channel aging in massive MIMO systems // Journal of Communications and Networks. 2013. Vol. 15. Iss. 4. PP. 338–351. DOI:10.1109/JCN.2013.000065
2. Yin H., Wang H., Liu Y., Gesbert D. Addressing the Curse of Mobility in Massive MIMO With Prony-Based Angular-Delay Domain Channel Predictions // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2020. Vol. 38. Iss. 12. PP. 2903–2917. DOI:10.1109/JSAC.2020.3005473
3. Castañeda E., Silva A., Gameiro A., Kountouris M. An Overview on Resource Allocation Techniques for Multi-User MIMO Systems // Communications Surveys and Tutorials. 2017. Vol. 19. Iss. 1. PP. 239–284. DOI:10.1109/COMST.2016.2618870
4. ETSI TS 138.211 V16.3.0 (2020-11). 5G; NR; Physical channels and modulation.
5. Chopra R., Murthy C.R., Suraweera H.A., Larsson E.G. Performance Analysis of FDD Massive MIMO Systems Under Channel Aging // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2018. Vol. 17. Iss. 2. PP. 1094–1108. DOI:10.1109/TWC.2017.2775629
6. Nguyen L.H., Rheinschmitt R., Wild T., Brink S. Limits of channel estimation and signal combining for multipoint cellular radio (CoMP) // Proceedings of the 8th International Symposium on Wireless Communication Systems (Aachen, Germany, 06–09 November 2011). IEEE, 2011. PP. 176–180. DOI:10.1109/ISWCS.2011.6125333
7. Zheng J., Zhang J., Bjornson E., Ai B. Impact of Channel Aging on Cell-Free Massive MIMO Over Spatially Correlated Channels // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2021. Vol. 20. Iss. 10. PP. 6451–6466. DOI:10.1109/TWC.2021.3074421
8. Bengtsson M., Ottersten B. Optimal and Suboptimal Transmit Beamforming // In: Godara L.C. (ed.) Handbook of Antennas in Wireless Communications. CRC Press, 2002.
9. Yu W., Lan T. Transmitter Optimization for the Multi-Antenna Downlink With Per-Antenna Power Constraints // IEEE Transactions on Signal Processing. 2007. Vol. 55. Iss. 6. PP. 2646–2660. DOI:10.1109/TSP.2006.890905
10. ETSI TR 138 901 V15.0.0 (2018-07) 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz.
11. Jaeckel S., Raschkowski L., Boerner K., Thiele L., Burkhardt F., Eberlein E. QuaDRiGa – Quasi Deterministic Radio Channel Generator. User Manual and Documentation. Document Revision: v2.2.0. Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, 2019.
12. Jaeckel S., Raschkowski L., Boerner K., Thiele L. QuaDRiGa: A 3-D Multicell Channel Model with Time Evolution for Enabling Virtual Field Trials // IEEE Transactions on Antennas Propagation. 2014. Vol. 62. Iss. 6. PP. 3242–3256. DOI:10.1109/TAP.2014.2310220
13. Grant M., Boyd S. CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming. Version 2.2 // CVX Research. 2020. URL: <http://cvxr.com/cvx> (Accessed 23.04.2024)
14. Kalachikov A.A., Streltsov G.G. FPGA implementation of Gaussian noise generator // Proceedings of the International Siberian Workshop on Electron Devices and Materials (Erlagol, Russia, 01–05 July 2004). IEEE, 2004. DOI:10.1109/PESC.2004.241133
15. 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. EDN:AWPRGA

## References

1. Castaneda E., Silva A., Gameiro A., Kountouris M. An Overview on Resource Allocation Techniques for Multi-User MIMO Systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017;19(1):239–284. DOI:10.1109/COMST.2016.2618870
2. Truong K.T., Heath R.W. Effects of channel aging in massive MIMO systems. *Journal of Communications and Networks*. 2013;15(4):338–351. DOI:10.1109/JCN.2013.000065
3. Yin H., Wang H., Liu Y., Gesbert D. Addressing the Curse of Mobility in Massive MIMO With Prony-Based Angular-Delay Domain Channel Predictions. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2020;38(12):2903–2917. DOI:10.1109/JSAC.2020.3005473
4. ETSI TS 138.211 V16.3.0 (2020-11). *5G; NR; Physical channels and modulation*.
5. Chopra R., Murthy C.R., Suraweera H.A., Larsson E.G. Performance Analysis of FDD Massive MIMO Systems Under Channel Aging. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018;17(2):1094–1108. DOI:10.1109/TWC.2017.2775629
6. Nguyen L.H., Rheinschmitt R., Wild T., Brink S. Limits of channel estimation and signal combining for multipoint cellular radio (CoMP). *Proceedings of the 8th International Symposium on Wireless Communication Systems, 06–09 November 2011, Aachen, Germany*. IEEE; 2011. p.176–180. DOI:10.1109/ISWCS.2011.6125333
7. Zheng J., Zhang J., Bjornson E., Ai B. Impact of Channel Aging on Cell-Free Massive MIMO Over Spatially Correlated Channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021;20(10):6451–6466. DOI:10.1109/TWC.2021.3074421
8. Bengtsson M., Ottersten B. Optimal and Suboptimal Transmit Beamforming. In: Godara L.C. (ed.) *Handbook of Antennas in Wireless Communications*. CRC Press; 2002.
9. Yu W., Lan T. Transmitter Optimization for the Multi-Antenna Downlink With Per-Antenna Power Constraints. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2007;55(6):2646–2660. DOI:10.1109/TSP.2006.890905
10. ETSI TR 138 901 V15.0.0 (2018-07) *5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*.
11. Jaeckel S., Raschkowski L., Boerner K., Thiele L., Burkhardt F., Eberlein E. *QuaDRiGa – Quasi Deterministic Radio Channel Generator. User Manual and Documentation*. Document Revision: v2.2.0. Fraunhofer Heinrich Hertz Institute; 2019.
12. Jaeckel S., Raschkowski L., Boerner K., Thiele L. QuaDRiGa: A 3-D Multicell Channel Model with Time Evolution for Enabling Virtual Field Trials. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*. 2014;62(6):3242–3256. DOI:10.1109/TAP.2014.2310220
13. Grant M., Boyd S. CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming. Version 2.2. *CVX Research*. 2020. URL: <http://cvxr.com/cvx> [Accessed 23.04.2024]
14. Kalachikov A.A., Streltsov G.G. FPGA implementation of Gaussian noise generator. *Proceedings of the International Siberian Workshop on Electron Devices and Materials, 01–05 July 2004, Erlagol, Russia*. IEEE; 2004. DOI:10.1109/PESC.2004.241133
15. Kalachikov A. Numerical Evaluation of the MU-MIMO Beamforming Performance with User Selection Algorithm. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(2):65–71. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-65-71. EDN:AWPRGA

Статья поступила в редакцию 14.03.2024; одобрена после рецензирования 12.04.2024; принята к публикации 19.04.2024.

The article was submitted 14.03.2024; approved after reviewing 12.04.2024; accepted for publication 19.04.2024.

## Информация об авторе:

**КАЛАЧИКОВ**  
Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем  
Сибирского государственного университета телекоммуникаций  
и информатики

 <https://orcid.org/0000-0003-1235-6314>