

# Исследование влияния эффекта устаревания канала связи на характеристики прекодирования в системе MU-MISO при различной скорости перемещения абонентов

А. А. Калачиков, И. И. Резван, А. В. Стенин

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

*Аннотация:* В статье рассматривается влияние задержек измеренного состояния канала, вызванное перемещением абонентов и связанным с задержками эффектом устаревания канала на характеристики прекодирования на основе метода кодовых книг ДПФ в многопользовательской системе MISO в нисходящем направлении. Оценка канала получена при помощи алгоритма MMSE. В работе рассматривается алгоритм прекодирования на основе кодовых книг и метод, основанный на численной оптимизации для вычисления весовых векторов прекодирования с целью повышения суммарной спектральной эффективности многопользовательской системы.

Для проведения численного моделирования использовался 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:* 5G new radio, прекодирование, MU-MISO, QUADRIGA, оценка канала.

*Для цитирования:* Калачиков А.А., Резван И.И., Стенин А.В. Исследование влияния эффекта устаревания канала связи на характеристики прекодирования в системе MU-MISO при различной скорости перемещения абонентов. // Вестник СибГУТИ. 2024. Т. 18, № 4. С. 32–42. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-4-32-42>.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Калачиков А. А., Резван И. И.,  
Стенин А. В., 2024

Статья поступила в редакцию 14.03.2024;  
переработанный вариант – 08.04.2024;  
принята к публикации 09.04.2024.

## 1. Введение

Применение многоантенных систем MIMO позволяет повысить спектральную эффективность и получить выигрыш от пространственного мультиплексирования в многопользовательских системах MU-MIMO 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 (channel state information) на стороне БС при вычислении весовых векторов прекодирования [1].

Точная и актуальная информация о состоянии канала в виде оценки канала очень важна для задач прекодирования в нисходящем (downlink – DL) направлении и для

комбинирования сигналов абонентов в восходящем (uplink – UL) направлении. В системе связи OFDM 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 базовой станции, включающая в себя оценивание канала по пилот-сигналам, распределение ресурсов системы, вычисление векторов прекодирования, вызывает задержки, которые могут превысить время когерентности канала, интервал времени, после которого оценка канала CSI является неактуальной, устаревшей.

Отличие состояния канала (импульсной или частотной характеристики), полученного при оценке канала, по которой производится вычисление весовых векторов прекодирования, от реальной текущей импульсной характеристики канала называют старением канала (channel aging) [2]. Уже на средней скорости абонентов порядка 30 км/ч характеристики системы снижаются на 50 процентов по сравнению с малоподвижными абонентами [3]. Поэтому изучение явления старения канала на характеристики системы связи является важным для правильной конфигурации параметров сигнала многопользовательской системы связи.

Модель канала при наличии эффекта старения канала рассмотрена в публикациях с учетом предположения о том, что автокорреляционная функция канала во времени описывается моделью Джейкса-Кларка и что смещение Доплера приводит к тому, что АКФ импульсной характеристики канала описывается функцией Бесселя первого рода нулевого порядка. 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 данном разделе проводится изучение влияния эффекта старения канала на характеристики прекодирования в многопользовательской нисходящей системе MISO для пользователей на транспортных средствах в реалистичных условиях распространения и пространственно коррелированных каналах связи.

## 2. Основные положения

### 2.1. Модель системы

На стороне БС системы связи используется антенна из  $N_T$  элементов, обслуживающая  $K$  пользователей, каждый из которых оборудован одной антенной. Коэффициенты передачи канала описываются вектором коэффициентов  $\mathbf{h}_k \in C^{N_T \times 1}$ . Набор индексов активных обслуживаемых абонентов  $U \subset \{1 \dots K\}$ , набор индексов, выбранных для прекодирования абонентов  $S \subset U$ . Вектор передаваемых символов  $\mathbf{x}_k \in C^{N_T \times 1}$  составляется в виде

$$\mathbf{x}_k = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k s_k$$
, где  $s_k$  – передаваемый символ данных пользователя  $k$  и  $\mathbf{w}_k \in C^{N_T \times 1}$  – вектор прекодирования пользователя  $k$ . Принятый вектор сигналов пользователя  $k$  на поднесущей с номером  $s$  и номером символа  $n$  запишется в виде

$$y_{k,n,s} = \mathbf{h}_{k,n,s}^T \mathbf{x}_{n,s} + n_{k,n,s} \text{ для } k = 1, \dots, K. \quad (2.1)$$

$n_{k,n,s}$  – комплексный гауссовский шум с нулевым матожиданием и дисперсией  $\sigma_k^2$ .

В матричной форме матрица канала MU-MIMO составляется из векторов каналов пользователей  $\mathbf{H}_{n,s} = [\mathbf{h}_{1,n,s} \dots \mathbf{h}_{K,n,s}]^T$  и вектор принятых сигналов пользователей определяется как

$$\mathbf{y}_{n,s} = \mathbf{H}_{n,s}^T \mathbf{x}_{n,s} + n_{n,s} \quad (2.2)$$

В системе 5G NR оценивание канала выполняется при использовании опорных сигналов на пилотных поднесущих в составе OFDM сигнала. Различные конфигурации опорных сигналов SRS в восходящем направлении приведены в [4]. Сигналы SRS передаются в составе OFDM символов с определенным расположением по поднесущим и номерам слотов. Параметры SRS включают конфигурации SRS с различной периодичностью SRS и расположением по полосе частот сигнала. Для каждой последовательности SRS настраиваются количество антенных портов SRS, символы в слоте, соответствующие каждой последовательности SRS sequence, слоты в периоде передачи SRS transmission, плотность поднесущих SRS в полосе частот сигнала.

Последовательность SRS генерируется путем циклического сдвига базисной последовательности, которая формируется из последовательности Задова – Чу. Базовая последовательность определяется как  $r_{u,v}^{SRS} = r_{u,v}^{\alpha}(n), n = 0, \dots, M_{SC}^{RS}$ ,  $M_{SC}^{RS}$  – длина последовательности опорного сигнала,  $u = 0, \dots, 29$  – номер группы базисной последовательности,  $v = 0, 1$  – номер последовательности в группе [4]. Базовая последовательность циклически сдвигается для увеличения общего числа доступных последовательностей. Сигналы SRS от различных пользователей могут быть мультиплексированы по частоте в пределах полосы частот сигнала используя различные комбинированные шаблоны в соответствии с частотным смещением.

При использовании прекодирования принятый сигнал для пользователя  $k$  определяется в виде

$$y_k = \mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k s_k + \sum_{j \neq k} \mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_j s_j + n_k, \text{ for } k = 1, \dots, K \quad (2.3)$$

где сумма соответствует сигналам интерференции со стороны других пользователей [1, 5].

Суммарная спектральная эффективность вычисляется как сумма спектральных эффективностей по всем пользователям по всем поднесущим и зависит от отношения сигнал/(шум + интерференция, SINR) каждого пользователя. Величина SINR пользователя на  $k$  одной поднесущей определяется как

$$SINR_k = \frac{|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j \neq k} |\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_j|^2 + K\sigma^2 / P} \quad (2.4)$$

Достижимая суммарная спектральная эффективность по всем пользователям вычисляется в виде  $R_{BF} = \sum_{k=1}^K (\log_2(1 + SINR_k))$ , бит/с/Гц. Данная величина используется как метрика, показатель качества, при моделировании алгоритмов прекодирования.

## 2.2. 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 [5].

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

$$\mathbf{h}_k[n] = \rho_k[n]\mathbf{h}_k[0] + \bar{\rho}_k[n]\mathbf{g}_k[n], \quad (2.5)$$

где индекс времени 0 соответствует последнему символу, переданному в период оценивания канала,  $\mathbf{g}_k[n]$  представляет независимый инновационный компонент в момент времени  $n$ ,  $\rho_k[n]$  представляет коэффициент корреляции вектора канала между реализациями канала в момент времени 0 и  $n$ . Для изотропных условий рассеяния  $\rho_k[n] = J_0(2\pi f_D T_s n)$ , 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.

### 3. Теоретические аспекты использования прекодирования

#### 3.1. Прекодирование по методу кодовых книг DFT и Type 2 precoding

При использовании прекодирования по методу кодовых книг вектор прекодирования выбирается из набора предварительно вычисленных кодовых слов, образующих кодовую книгу. На стороне абонента вычисляется индекс и норма вектора как информация по качеству канала (CQI) и передается на базовую станцию для прекодирования и распределения ресурсов абонентов.

Кодовая книга ДПФ (DFT) может быть рассчитана для любого количества антенн и кодовых слов [8]. Кодовая книга DFT  $CB_{DFT}$  для  $N_T$  антенн на БС и  $N_{CB}$  кодовых слов описывается в виде  $CB_{(DFT)} = [w_1 \cdots w_{N_{cb}}]$ , где кодовое слово  $w_i$  вычисляется как

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{N_T}} [1 e^{j\frac{2\pi}{N_{cb}}i} \cdots e^{j\frac{2\pi}{N_{cb}}(N_T-1)i}]^T \quad (3.1)$$

На приемной стороне пользователь с номером  $k$  выбирает кодовое слово  $w_k$  из кодовой книги  $C_{CB}$  предварительно рассчитанных весовых векторов  $w_i \in C_{cb}$ , которое максимизирует норму  $w_k = \operatorname{argmax} |\mathbf{h}_k^H w_i|^2$ . Индекс выбранного кодового слова и соответствующая норма отправляются на базовую станцию как показатели качества канала (CQI) и используются для прекодирования и планирования нагрузки абонентов.

Оценивание канала по методу наименьших квадратов LS выполняется на поднесущих пилот сигналов в частотной области используя сформированные последовательности SRS. Последовательности равномерно распределяются по полосе сигнала для всех пользователей. Оценка канала на каждой пилотной поднесущей вычисляется в виде

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

Оценка канала LS всегда имеет ошибку оценивания, что приводит к неточному значению CSI, передаваемому по каналу обратной связи. Это нарушает ортогональность между каналами пользователей и вычисленными весовыми векторами прекодирования, что снижает суммарную спектральную эффективность.

На стороне базовой станции могут устанавливаться одно и многопанельные антенны в виде плоской антенной решетки размером  $N_1$  и  $N_2$ . Вектор прекодирования описывается в виде  $w_k = W_1 w_2$ ,  $W_1 \in C^{N_T \times 2L}$ ,  $w_2 \in C^{2L \times 1}$ ,  $L$  – количество на каждый пространственный слой. Диагональная блочная матрица  $W_1$  определяется как  $W_1 = \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix}$ , луч  $b$  выбирается из кодовой книги по горизонтальному и вертикальному индексам как  $b(l_h, l_v) = w_{l_h} \otimes w_{l_v}$  где горизонтальные и вертикальные векторы прекодирования DFT перемножаются в виде произведения Кронекера. Матрица  $W_1$  используется для всего частотного диапазона, матрица

$w_2$  используется как поддиапазонный фазовый коэффициент. Кодовая книга 2 типа позволяет более точное пространственное разрешение для подавления межпользовательской интерференции [5]. На стороне базовой станции соответствующее кодовое слово  $w_i$  выбирается по максимуму нормы  $|h_k w_i|^2$  для измеренного канала  $h_k$ . Выбор основан на вычислении информации матрицы прекодирования (PMI) обеспечиваемой каналом обратной связи.

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

Характеристики прекодирования ZF для быстро перемещающихся абонентов для случая с задержкой оценки канала не являются оптимальными. Задача поиска оптимальных весовых векторов прекодирования может быть сформулирована и решена как задача оптимизации по поиску максимума [8,9]. Задача оптимизации формулируется в виде задачи выпуклого программирования второго порядка с целью определения стационарных точек. Целью является нахождение весовых коэффициентов  $w_1, \dots, w_K$  которые максимизируют суммарную спектральную эффективность  $R_{BF}$  в зависимости от величин отношения сигнал/шум пользователей  $SINR_k$  при ограничении мощности передатчика БС

$$\begin{aligned} \max_{w_1, \dots, w_K \in C^{N_t}} \quad & R_{BF} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{k=1}^K \|w_k\|^2 < P \end{aligned} \quad (3.2)$$

Целевая функция  $R_{BF}$  зависит от значений SINRs, которые являются невыпуклыми функциями векторов прекодирования  $(w_1, \dots, w_K)$ . Поиск весовых векторов прекодирования может быть сформулирован как проблема минимизации общей мощности передатчика с учетом ограничений на SINR пользователей constraints  $\gamma_k$  у каждого из K абонентов. Величины  $\gamma_k$  являются минимальными допустимыми значениями SINR для пользователя k. Соответствующая задача минимизации формулируется в следующем виде

$$\begin{aligned} \min_{w_1, \dots, w_K \in C^{N_t}} \quad & \sum_{k=1}^K \|w_k\|^2 \\ \text{s.t.} \quad & SINR_k \geq \gamma_k \end{aligned} \quad (3.3)$$

Решение этой задачи составляет весовые векторы, которые позволяют достичь требуемых величин SINR, используя минимизацию мощности передатчика. Эта задача может быть переформулирована как задача выпуклой оптимизации. Ограничения  $SINR_k \geq \gamma_k$  могут быть записаны в виде

$$|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k|^2 \geq \gamma_k \sum_{j \neq k} |\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_j|^2 + \gamma_k \sigma^2. \quad (3.4)$$

Скалярное произведение  $\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k$  должно быть реальным и положительным  $Im(\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k) = 0$ . Ограничение может быть записано как

$$|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k|^2 \geq \gamma_k \sum_{j \neq k} |\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_j|^2 + \gamma_k \sigma^2. \quad (3.5)$$

Записанное в таком виде ограничение SINR является ограничением второго рода [8, 9].

Задача оптимизации может быть эффективно решена с использованием программной реализации методов выпуклой оптимизации CVX [10].

#### 4. Результаты моделирования алгоритмов прекодирования Type 2 CSI и метода на основе оптимизации

Характеристики прекодирования определяются методом численного моделирования. В разделе сравниваются характеристики прекодирования по методу кодовых книг type 2 CSI и метода на основе численной оптимизации для абонентов на транспортных средствах. Для моделирования используется пакет программ модели QUADRIGA, позволяющая строить различные условия распространения и задавать свойства перемещения абонентов, сравнение выполняется по величине суммарной спектральной эффективности [8,9]. Параметры моделирования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры модели

Параметр модели	
Тип модели	QuaDRiGa version 2.2
Сценарий	3GPP 38.901 UMi NLoS
Центральная частота	4.5 GHz
Количество многолучевых компонент	12
Количество подполос	512
Полоса частот системы	20 MHz
Количество антенн БС	16
Скорость абонентов	30, 60 км/ч
Количество абонентов	4

Моделирование проводилось для сценария 3GPP 38.901 UMi NLoS. В соответствии с условиями сценария UMi пользователи равномерно распределены вокруг БС на расстоянии 200 м от БС [13]. На рис. 1 показано распределение пользователей по территории и приведены их траектории перемещения. При моделировании не вычислялись потери распространения и затенение, коэффициенты узкополосных каналов нормируются к единичной мощности.

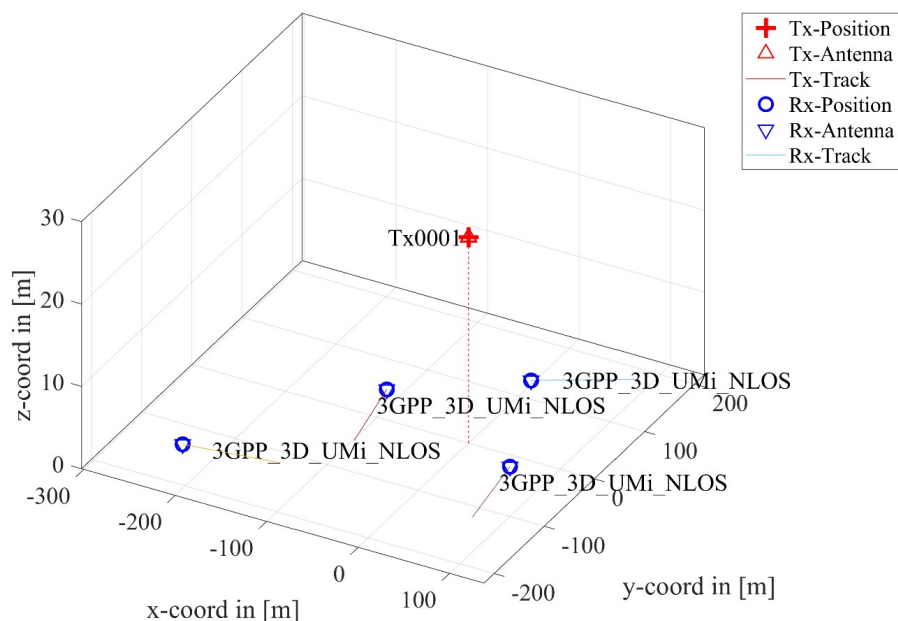


Рис.1. Распределение пользователей и траектории перемещения

Базовая станция оборудована 16 антеннами, система обслуживает  $K = 4$  случайно распределенных пользователей, каждый пользователь оборудован одной антенной. Центральная частота установлена 4.5 GHz.

Для каждого пользователя определяется линейная траектория движения с заданной скоростью. Длительность траектории во всех экспериментах равна 200 метров, что позволяет получить примерно 6000 реализаций импульсных характеристик канала на скорости 30 км/ч и 20000 импульсных характеристик канала на скорости 60 км/ч.

Сценарий моделирования 3GPP 38.901 UMi NLoS. На рис. 2 показан спектр Доплера для выбранного пользователя на скорости 60 км/ч. Для канала между БС и абонентом 1 смещение Доплера составляет 250 Гц.

Полученные реализации канала для каждого пользователя и передающей антенны состоят из многолучевых компонент. Частотная характеристика канала вычисляется по данным компонентам для полосы 20 МГц разделенной на 512 поднесущих передаваемого сигнала. Для каждой поднесущей вычисляется вектор прекодирования по методу кодовых книг type 2 CSI и по методу численной оптимизации.

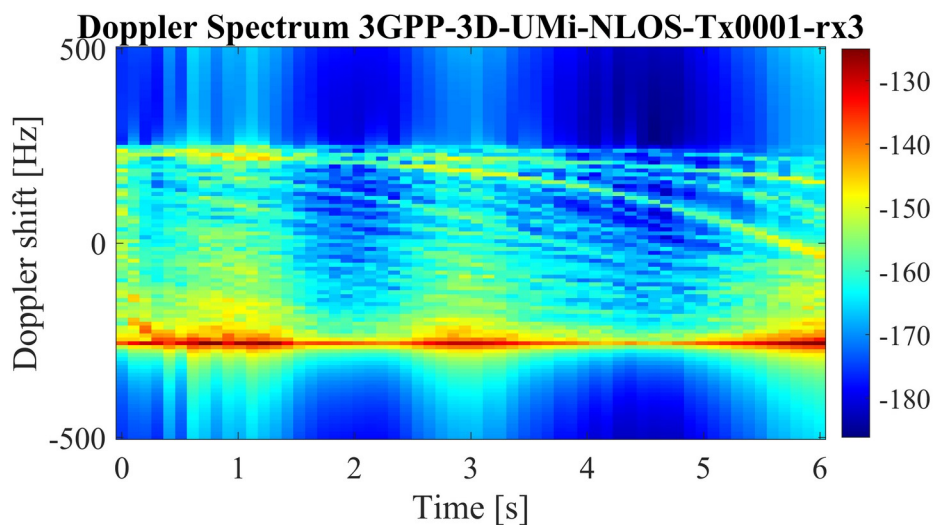


Рис. 2. Спектр Доплера в канале пользователя 1 на скорости 60 км/ч

На рис. 3 представлены значения нисходящего SINR для двух скоростей пользователей на первых 30 индексах OFDM символов. Первый символ соответствует положению пилотного символа, последующие – символы передачи данных используя полученные оценки канала на пилотных поднесущих для вычисления векторов прекодирования.

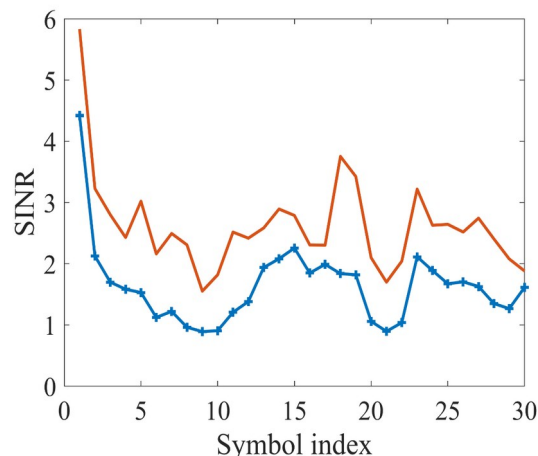


Рис. 3 – Распределение SINR по индексам OFDM символов

Соответствующие реализации канала MISO получены на основе пакета модели канала Quadriga. Колебательный характер значений SINR соответствует временной корреляции коэффициентов канала. Скорость обновления реализаций канала в модели  $T_s = 0.001$  s. При увеличении скорости пользователей и нормированному смещению частоты Доплера  $F_D T_s$  увеличивается интервал положения первого минимума SINR, минимум смещается влево. Значение индекса, соответствующее первому минимуму, используется для выбора подходящего интервала размещения пилот сигналов в слоте, снижая влияние устаревания канала.

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 SOCP решалась при помощи пакета программ выпуклой оптимизации CVX [12].

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

При низких скоростях около 30 км/ч разница в характеристиках спектральной эффективности между алгоритмом по методу кодовых книг типа 2 CSI и численной оптимизацией заметен достаточно отчетливо, среднее значение спектральной эффективности прекодера по методу кодовых книг типа 2 CSI 2.2 бит/с.Гц, среднее значение спектральной эффективности прекодирования на основе численной оптимизации составляет 2.8 бит/с.Гц.

С увеличением скорости абонентов снижение характеристик прекодера по методу кодовых книг типа 2 CSI становится заметнее. На скорости 60 км/ч средняя спектральная эффективность для прекодера по методу кодовых книг типа 2 CSI составляет 1.6, прекодера на основе численной оптимизации – 2.6 бит/с.Гц.

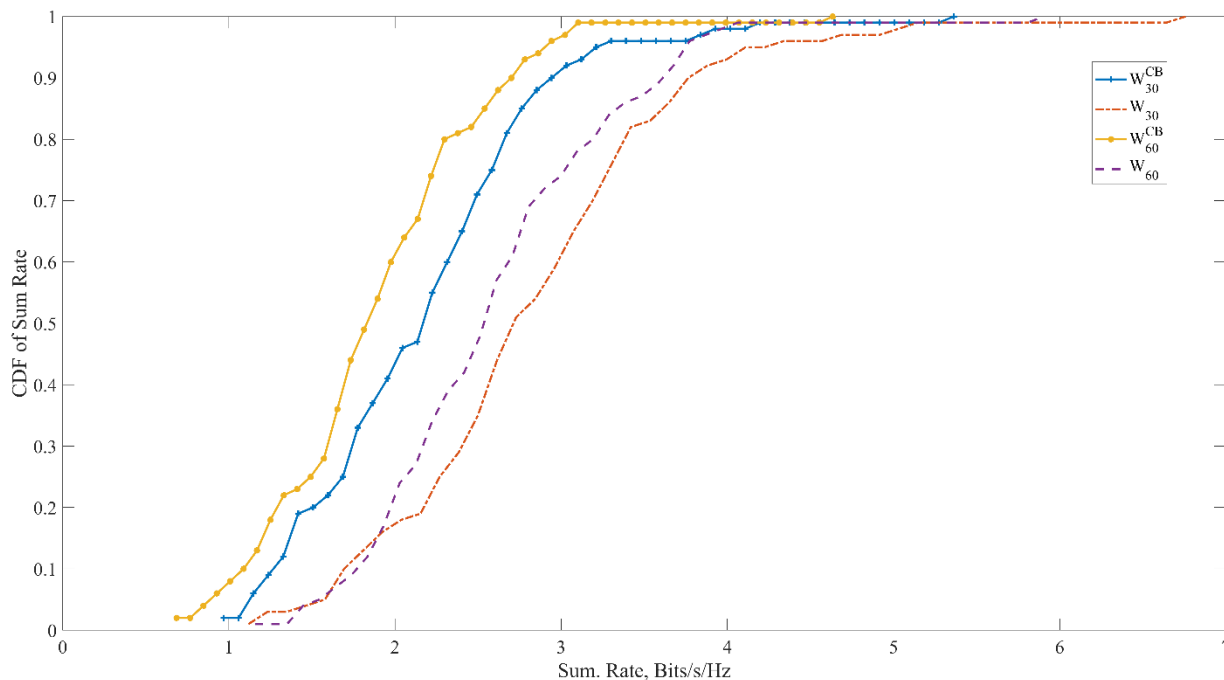


Рис. 4. Распределение SINR с использованием прекодирования

## 5. Заключение

При перемещении абонентов и быстром изменении условий распространения на характеристики прекодирования влияет эффект устаревания канала. 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 по методу кодовых книг type 2 CSI для абонентов на транспортных средствах.

## Литература

1. *E. Castaneda, A. Silva, A. Gameiro, and M. Kountouris*, An overview on resource allocation techniques for multi-user MIMO systems, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 239-284, 2017.
2. *Truong, K.T.; Heath, R.W.* Effects of channel aging in massive MIMO systems. *J. Commun. Netw.* 2013, 15, 338-351.
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 J. Sel. Areas Commun.* 2020, 38, 2903-2917.
4. 3GPP, NR; Physical channels and modulation, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.211, 10, version 16.3.0.
5. *R. Chopra, C. R. Murthy, H. A. Suraweera, and E. G. Larsson*, Performance analysis of FDD massive MIMO systems under channel aging, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 2, pp. 1094-1108, Feb. 2018.
6. *L. H. Nguyen, R. Rheinschmitt, T. Wild, and S. Brink*, Limits of channel estimation and signal combining for multipoint cellular radio, in *Proc. 8th Int. Symp. Wireless Communication Systems*, 2011, pp. 176-180.
7. *J. Zheng, J. Zhang, E. Bjornson, and B. Ai*, Impact of channel aging on cell-free massive MIMO over spatially correlated channels, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 10, pp. 6451-6466, 2021.
8. *M. Bengtsson and B. Ottersten*, Optimal and suboptimal transmit beamforming, in *Handbook of Antennas in Wireless Communications*, L. C. Godara, Ed. CRC Press, 2001.
9. *W. Yu and T. Lan*, Transmitter optimization for the multi-antenna downlink with per-antenna power constraints, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 6, pp. 2646-2660, 2007.
10. *S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Boerner and L. Thiele, F. Burkhardt, E. Eberlein*, "QuaDRiGa - Quasi Deterministic Radio Channel Generator," User Manual and Documentation. Tech. Rep. v2.2.0, Fraunhofer Heinrich Hertz Institute (2019).
11. *S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Boerner and L. Thiele*, QuaDRiGa: A 3-D Multicell Channel Model with Time Evolution for Enabling Virtual Field Trials, *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2014.
12. *M. Grant, S. Boyd*, CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1.. [сайт]. [2019]. URL: <http://cvxr.com/cvx> (дата обращения: 31.01.2024).
13. *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.) <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2023-9-2-65-71>

### **Калачиков Александр Александрович**

к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, д. 86), тел. +7 383 2698 267, e-mail: [kalatch@sibgut.ru](mailto:kalatch@sibgut.ru), ORCID ID: 0000-0003-1235-6314.

**Резван Иван Иванович**

к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, д. 86), тел. (383) 269-82-93, e-mail: rezvan@sibsutis.ru, ORCID ID: 0009-0002-6875-7061.

**Стенин Александр Владиславович**

старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем и сетей, (630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, д. 86), тел. (383) 269-82-42, e-mail: av.stenin@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-7851-3012.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Вклад соавторов: каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.*

**Investigation of the influence of the effect of communication channel aging on the characteristics of precoding in the MU-MISO system at different speeds of movement of subscribers.**

Aleksander A. Kalachikov, Ivan I. Rezvan, Aleksander V. Stenin  
Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

*Abstract:* The paper deals with the impact of measured channel state delays caused by subscriber movement and the delay-related effects of channel aging on the performance of DFT codebook precoding in a downstream multi-user MISO system. The channel estimate is obtained using the MMSE algorithm. The paper discusses a precoding algorithm based on codebooks and a method based on numerical optimization for calculating precoding weight vectors in order to increase the total spectral efficiency of a multi-user system.

To carry out numerical modeling, the QUADRIGA radio channel modeling package was used, which allows us to obtain the required volume of MISO channel implementations when subscribers move at different speeds. A comparison of the obtained precoding characteristics of the compared algorithms in a channel with movement of subscribers and the presence of spatial correlation is performed based on the distribution function of the average spectral efficiency over a set of users.

*Keywords:* 5G new radio, precoding, MU-MISO, QUADRIGA, channel estimation.

*For citation:* Kalachikov A. A., Rezvan I. I., Stenin A. V. Investigation of the influence of the effect of communication channel aging on the characteristics of precoding in the MU-MISO system at different speeds of movement of subscribers (in Russian). *Vestnik SibGUTI*, 2024, vol. 18, no. 4, pp. 32-42. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-4-32-42>.



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Kalachikov A. A., Rezvan I. I., Stenin A. V.,  
2024

The article was submitted: 14.03.2024;  
revised version: 08.04.2024;  
accepted for publication 09.04.2024.

## References

1. *E. Castaneda, A. Silva, A. Gameiro, and M. Kountouris*, An overview on resource allocation techniques for multi-user MIMO systems, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 239-284, 2017.
2. *Truong, K.T.; Heath, R.W.* Effects of channel aging in massive MIMO systems. *J. Commun. Netw.* 2013, 15, 338-351.
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 J. Sel. Areas Commun.* 2020, 38, 2903-2917.
4. 3GPP, NR; Physical channels and modulation, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.211, 10, version 16.3.0.
5. *R. Chopra, C. R. Murthy, H. A. Suraweera, and E. G. Larsson*, Performance analysis of FDD massive MIMO systems under channel aging, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 2, pp. 1094-1108, Feb. 2018.
6. *L. H. Nguyen, R. Rheinschmitt, T. Wild, and S. Brink*, Limits of channel estimation and signal combining for multipoint cellular radio, in *Proc. 8th Int. Symp. Wireless Communication Systems*, 2011, pp. 176-180.
7. *J. Zheng, J. Zhang, E. Bjornson, and B. Ai*, Impact of channel aging on cell-free massive MIMO over spatially correlated channels, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 10, pp. 6451-6466, 2021.
8. *M. Bengtsson and B. Ottersten*, Optimal and suboptimal transmit beamforming, in *Handbook of Antennas in Wireless Communications*, L. C. Godara, Ed. CRC Press, 2001.
9. *W. Yu and T. Lan*, Transmitter optimization for the multi-antenna downlink with per-antenna power constraints, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 6, pp. 2646-2660, 2007.
10. *S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Boerner and L. Thiele, F. Burkhardt, E. Eberlein*, "QuaDRiGa - Quasi Deterministic Radio Channel Generator," User Manual and Documentation. Tech. Rep. v2.2.0, Fraunhofer Heinrich Hertz Institute (2019).
11. *S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Boerner and L. Thiele*, QuaDRiGa: A 3-D Multicell Channel Model with Time Evolution for Enabling Virtual Field Trials, *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2014.
12. *M. Grant, S. Boyd*, CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1.. available at: <http://cvxr.com/cvx> (access: 31.01.2024).
13. *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.) <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2023-9-2-65-71>

### **Aleksander A. Kalachikov**

cand. of sci. (Engineering), lecturer of the Department of Radio Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), phone +7 383 2698267, e-mail: [kalatch@sibguti.ru](mailto:kalatch@sibguti.ru), ORCID ID: 0000-0003-1235-6314.

### **Ivan I. Rezvan**

cand. of sci. (Engineering), lecturer of the Department of Radio Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), phone (383) 269-82-93, e-mail: [rezvan@sibsutis.ru](mailto:rezvan@sibsutis.ru), ORCID ID: 0009-0002-6875-7061.

### **Aleksander V. Stenin**

senior lecturer of the Department of Radio Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), phone (383) 269-82-42, e-mail: [av.stenin@yandex.ru](mailto:av.stenin@yandex.ru), ORCID ID: 0000-0002-7851-3012.