

Научная статья

УДК 621.391

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-65-71



Анализ характеристик алгоритмов прекодирования сигналов в системе MU-MIMO с группированием абонентов

✉ Александр Александрович Калачиков, 330rts@gmail.com

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

Аннотация: В статье представлены результаты имитационного моделирования алгоритма прекодирования ZF с использованием алгоритма ортогонального выбора абонентов и алгоритма максимизации взаимной информации в нисходящей системе MU-MIMO. При количестве пользователей большем, чем количество антенн на базовой станции, возникает взаимная корреляция между каналами пользователей, что снижает суммарную спектральную эффективность системы MU-MIMO. Для снижения эффекта взаимной корреляции применяется подбор пользователей на основе максимальной ортогональности между ними. Суммарная спектральная эффективность в системе MU-MIMO зависит от условий реального распространения сигналов и для каналов с пространственной корреляцией необходимо использовать выбор подмножества абонентов с низкой корреляцией между их векторами каналов. Для исследования эффективности выбора подмножества абонентов используется модель канала с открытым исходным кодом, позволяющая получать реалистичные реализации канала.

Ключевые слова: 5G new radio, QuaDRiGa, 3GPP модель канала, прекодирование ZF, система MU-MIMO, группирование абонентов

Ссылка для цитирования: 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

Numerical Evaluation of the MU-MIMO Beamforming Performance with User Selection Algorithm

✉ Александр Калачиков, 330rts@gmail.com

Siberian State University of Telecommunications and Informatics,
Novosibirsk, 630102, Russian Federation

Abstract: This paper presents the numerical evaluation of the ZF beamforming algorithm using the user selection in the multiuser multi-antenna (MU-MIMO) downlink system. Two user selection algorithms – semi-orthogonal user selection and greedy user selection are numerically evaluated based on the open source MIMO channel model. The sum rate performance depending on number of users are presented. The arising inter user correlation degrades the sum rate (spectral efficiency) performance of multiuser MIMO system especially in scenarios where the number of users is larger than the number of antennas at the BS. The selection of users is based on the orthogonality of the channels among selected users. For MIMO channel simulation the QUADRIGA channel model reflecting the real propagation conditions is used. The obtained performance of MU-MIMO ZF precoding in spatially correlated channel are compared based on the empirical cumulative density function of the sum rate of multiple users. Numerical results

show that the ZF precoder using user selection (G ZF) outperforms the ZF precoder with random user selection in spectral efficiency. The greedy user selection in spatially correlated channel has advantage to semi-orthogonal user selection. It is observed that as the increasing the number of served users used for selection the greedy user selection gives better performance than semi-orthogonal algorithm.

Keywords: 5G new radio, QuaDRiGa, 3GPP channel model, ZF precoding, multiuser MIMO system, user selection

For citation: Kalachikov A. Numerical Evaluation of the MU-MIMO Beamforming Performance with User Selection Algorithm. *Proc. of Telecom. Universities*. 2023;9(2):65–71. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-65-71

I. Введение

Технология многоантенных систем связи MIMO (аббр. от англ. Multiple Input, Multiple Output) является базовой в современных мобильных сетях для повышения спектральной эффективности (СЭ) системы связи за счет перегрузки (повторного использования) частотно-временных ресурсов системы, одновременной передачи сигналов нескольких пользователей на этих ресурсах при соответствующем прекодировании сигналов. Прекодирование состоит в обработке независимых сигналов пользователей при формировании передаваемого сигнала многоантенной системой. При обработке происходит умножение передаваемых символов на комплексные весовые векторы, что определяет пространственные свойства передаваемых сигналов. СЭ прекодирования зависит от конкретных условий распространения сигналов в радиоканале между базовой станцией (БС) и абонентами. В практических сценариях развертывания сети абоненты распределены случайно, но во многих случаях, особенно в городской застройке, расположены с большей плотностью. Это приводит к коррелированности векторов каналов абонентов и снижению эффективности прекодирования, уменьшается СЭ при количестве пользователей больше, чем количество антенн БС [1].

В системах MU-MIMO рассматриваются подоптимальные методы линейного прекодирования, позволяющие получить выигрыш от пространственного мультиплексирования. К ним относятся, в частности, алгоритм обнуления интерференции (ZF, аббр. от англ. Zero Forcing), основанный на обращении матрицы канала пользователей, метод блочной диагонализации (BD, аббр. от англ. Block Diagonalization), основанный на вычислении сингулярного разложения матрицы канала пользователей, регуляризованные варианты указанных алгоритмов, позволяющие улучшить их характеристики в каналах с наличием пространственной корреляции [2].

Если количество пользователей превышает количество антенн БС, используются алгоритмы выбора подмножества пользователей, для которых применяется прекодирование и повышается суммарная СЭ. Выбор основан на принципе ортогональности векторов каналов между выбранными пользователями. Каналы в подмножестве должны иметь низкую коррелированность, быть почти ортогональными. Пользователи с высокой корреля-

цией между каналами выбираются алгоритмом распределения ресурсов для передачи на другом частотно-временном блоке [2]. Изучение числовых характеристик прекодирования с использованием методов выбора в сценариях практического развертывания необходимо с точки зрения практической реализации как часть задачи комплексного моделирования алгоритмов на системном уровне.

В данной статье представлены результаты численного моделирования алгоритмов прекодирования с использованием выбора подмножества абонентов на модели канала, реалистично отражающей распространение сигналов в заданном сценарии. В качестве алгоритма прекодирования используется алгоритм ZF, достаточно просто реализуемый стандартными вычислительными функциями.

II. Теория

A. Модель системы связи

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 следующем виде:

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

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

Принятый вектор сигналов пользователя k на поднесущей с номером s и номером символа n запишется в виде:

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

где $n_{k,n,s}$ – комплексный гауссовский шум с нулевым матожиданием и дисперсией σ_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 выражением:

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

В системе 5G NR оценивание канала выполняется при использовании опорных сигналов на пилотных поднесущих в составе OFDM-сигнала (*аббр. от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов). Оценивание канала связи на стороне БС выполняется в частотной области на основе пилот-сигналов SRS (*аббр. от англ. Sounding Reference Signals*). Каждому абоненту присваивается определенная последовательность, размещенная по полосе частот системы. После приема пилот-сигналов SRS на стороне БС вычисляется частотная характеристика канала, на поднесущих с данными пользователей частотная характеристика интерполируется. Различные конфигурации опорных сигналов в восходящем направлении приведены в [3]. Сигналы SRS передаются в составе OFDM-символов с определенным расположением по поднесущим и номерам слотов. Для каждой последовательности SRS настраиваются количество антенных портов, символы в слоте, соответствующие каждой последовательности, слоты в периоде передачи, плотность пилотных поднесущих в полосе частот сигнала.

Последовательность SRS генерируется путем циклического сдвига базисной последовательности, которая формируется из последовательности Задова-Чу. Базовая последовательность определяется как $r_{u,v}^{SRS} = r_{u,v}^{\alpha}(n), n = 0, \dots, M_{SC}^{RS}$, где M_{SC}^{RS} – длина последовательности опорного сигнала; $u = 0, \dots, 29$ – номер группы базисной последовательности; $v = 0, 1$ – номер последовательности в группе. 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 [3].

Оценивание канала выполняется в частотной области с использованием алгоритма наименьших квадратов (LS, *аббр. от англ. Least Squares*). На пилотных поднесущих SRS оцениваются коэффициенты частотной характеристики делением принятого значения сигнала на значение элемента SRS последовательности для каждого абонента. Значения коэффициентов передачи на поднесущих с данными пользователя интерполируется линейной или кубической интерполяцией.

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

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

где сумма соответствует сигналам интерференции со стороны других пользователей [4].

Суммарная СЭ вычисляется как сумма по всем пользователям и поднесущим и зависит от соотношения сигнал/(шум + интерференция) SINR (*аббр. от англ. Signal Interference + Noise Ratio*) каждого пользователя.

Величина SINR пользователя k на одной поднесущей вычисляется по выражению:

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

где в числителе находится мощность сигнала пользователя k , в знаменателе сумма мощности переданных сигналов других пользователей (сигналы интерференции) и внутренних тепловых шумов [4].

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

В. Частично ортогональный выбор пользователей

Алгоритмы выбора абонентов являются частью системы распределения ресурсов и планирования нагрузки системы связи. Данные алгоритмы выполняют поиск группы абонентов K в виде подмножества всех обслуживаемых абонентов \hat{K} данной БС. Соответствующая комбинация пользователей K находится по критерию максимизации суммарной СЭ – R_{BF} .

Субоптимальный метод выбора абонентов с ограниченной ортогональностью (SUS, *аббр. от англ. Semi orthogonal User group Selection*) выполняет последовательный подбор абонентов с допущением на неполную ортогональность между векторами каналов [5]. На первой итерации алгоритма выбирается набор параметров – набор выбранных пользователей $\mathbf{S}^0 = \mathbf{0}$, набор оставшихся пользователей $T^{\{1\}} = \{1 \dots K\}$.

Используя метод ортогонализации Грамма-Шмидта, на n -й итерации вычисляется компонента \mathbf{g}_k вектора канала \mathbf{h}_k , ортогональная подпространству, сформированная векторами каналов предыдущих выбранных пользователей $\mathbf{g}_1 \dots \mathbf{g}_{n-1}$:

$$\mathbf{g}_k = \mathbf{h}_k - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\mathbf{h}_k \mathbf{g}_j^*}{\|\mathbf{g}_j\|^2} \mathbf{g}_j. \quad (5)$$

В соответствии с вычисленным значением \mathbf{g}_k n -й пользователь выбирается по наибольшей норме проекции $\|\mathbf{g}_k\|^2$ и вектор \mathbf{h}_k удаляется из списка оставшихся пользователей. Из набора оставшихся пользователей выбираются почти ортогональные вектору \mathbf{g}_k , и процесс итерационно повторяется, пока набор оставшихся пользователей не окажется пустым $T^{\{n+1\}} = \mathbf{0}$ [5].

C. Выбор пользователей на основе алгоритма поглощения

Алгоритм поглощения (от англ. Greedy User Selection) выполняет подбор пользователей на основе вычисления СЭ каждого при максимизации суммарной СЭ [6]. На этапе инициализации для каждого пользователя с вектором канала \mathbf{h}_k вычисляется коэффициент $r_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_k$ и находится первый выбранный пользователь с индексом s_1 : $s_1 = \text{argmax}(r_k), k \in U$. Устанавливается множество выбранных пользователей $S_1 = \{s_1\}$ и вычисляется СЭ $R_{BF}(S_1)$; после это – суммарная СЭ по оставшимся пользователям. Находится пользователь s_k по выражению:

$$s_k = \text{argmax}(R_{BF}(S_{k-1} \cup s_k)).$$

Устанавливается $S_k = S_{k-1} \cup s_k$ и вычисляется $R_{BF} = R_{BF}(S_k)$. Если $R_{BF}(S_k) \leq R_{BF}(S_{k-1})$, поиск заканчивается и выбирается $S = S_{k-1}$.

Алгоритм поглощения последовательно добавляет пользователей к набору выбранных, если суммарная СЭ при этом увеличивается. На первой итерации выбирается пользователь с максимальным значением нормы вектора канала и вычисляется СЭ; на последующих итерациях – их суммарная СЭ. Если она на n -й итерации снижается по сравнению с предыдущей ($n - 1$) итерацией, то n -й пользователь отбрасывается. Для выбранных пользователей вычисляются весовые вектора прекодирования по алгоритму обнуления сигналов интерференции ZF.

D. Прекодирование по алгоритму ZF

Алгоритм ZF вычисляет весовые векторы прекодирования для снижения взаимной интерференции между всеми пользователями данного частотно-временного ресурса. Алгоритм использует псевдообращение матрицы канала и на ее основе вычисляет векторы прекодирования. Вектор прекодирования ZF \mathbf{w}_k пользователя k ортогонален комплексно сопряженным векторам каналов всех остальных пользователей $\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_j = 0$ для $j \neq k$. Матрица прекодирования \mathbf{W}_{ZF} составляется из векторов прекодирования всех пользователей и вычисляется на основе матрицы канала $\mathbf{H}_{n,s}$ как ее псевдообращение $\mathbf{W}_{ZF} = \mathbf{H}(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$. Матрица канала $\mathbf{H}_{n,s}$ оценивается на пилотных поднесущих.

В реальных условиях распространения радиоканал является пространственно-коррелированным [7]. При этом элементы матрицы канала $\mathbf{H}_{n,s}$ взаимно коррелированы и это свойство значительно определяет характеристики системы MU-MIMO. Вычисление обратной матрицы коррелированного канала бывает затруднительно и матрица канала $\mathbf{H}_{n,s}$ становится плохо обусловленной, что приводит к увеличению уровня шума в пространственных каналах с большим значением собственных чисел [8].

E. Модель канала QuaDRiGa

Для решения задач моделирования и определения характеристик прекодирования MU-MIMO в практических сценариях развертывания используется модель канала 5G NR. Модель канала с открытым исходным кодом QuaDRiGa является 3GPP-3D геометрической вероятностной моделью, реализованной в соответствии с требованиями стандарта [9] с параметризацией по результатам многочисленных измерений радиоканалов.

Для проведения имитационного моделирования используется реализация модели канала 3GPP 3D с открытым исходным кодом QuaDRiGa [11, 12]. Модель позволяет получить реалистичные реализации канала при различных сценариях развертывания. Модель канала QuaDRiGa параметризуется в соответствии с необходимым сценарием развертывания сети. По выбранному сценарию генерируется расположение кластеров объектов, отражающих и рассеивающих колебания. Угловое рассеяние отраженных сигналов, параметры крупномасштабных и мелкомасштабных замираний генерируются вероятностным методом для каждой реализации канала.

Основные параметры системы моделирования определяются перед генерированием реализаций канала. Положение БС, конфигурация антенн, траектория перемещения абонентов и соответствующие сценарии распространения являются исходными параметрами. Генерация реализаций канала состоит из генерации параметров крупномасштабных замираний (рассеяние задержек, угловое рассеяние) и положения рассеивающих кластеров объектов [11, 12].

III. Результаты моделирования

В данном разделе представлены результаты моделирования алгоритма ZF с использованием двух алгоритмов выбора пользователей. Характеристики прекодирования оцениваются по величине средней СЭ с использованием реализаций канала, полученных в модели канала QuaDRiGa. Параметры моделирования приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Параметры моделирования

TABLE 1. Simulation Parameters

Параметр модели	Значение
Тип модели	QuaDRiGa v.2.2
Сценарий	3GPP 38.901 UMiNLoS
Количество многолучевых компонент	12
Центральная частота	3,6 ГГц
Полоса	20 МГц
Количество поднесущих	400
Количество пользователей	4–36
Количество пользователей в группе	4
Количество антенн на БС	8–16

В соответствии с сценарием городской застройки и малой размерности зоны покрытия БС (UMi) пользователи распределены равномерно вокруг БС на удалении до 500 м от БС. Реализация канала для данного пользователя и элемента антенны на БС состоит из многолучевых компонент. Частотная характеристика каждого канала в полосе 20 МГц делится на 400 поднесущих передаваемого сигнала. Для каждой поднесущей вычисляется вектор прекодирования.

Канал каждого пользователя и весовые векторы прекодеров нормируются к единичной мощности. Мощность передатчика выбирается $P = 1$, мощность шума – σ_n^2 , отношение сигнал/шум – $SNR = 1/\sigma^2 = 12$ дБ. Для сравнения эффективности прекодирования при различных условиях распространения были выбраны две величины числа обусловленности, соответствующие различной степени пространственной корреляции. Число обусловленности $CN = 240$ соответствует каналу со средней пространственной корреляцией, $CN = 500$ соответствует сильно коррелированному каналу.

Результаты моделирования показаны в виде функций распределения СЭ. На рисунке 1 показано распределение суммарной СЭ при прекодировании ZF для случайного выбора абонентов и для выбора по алгоритму SUS для подмножества из 4-х пользователей, выбираемых из общего множества 36 пользователей.

Для данных условий распространения прекодер ZF с выбором абонентов SUS показывает большую СЭ по сравнению со случайным выбором абонентов. Прекодер с выбором по алгоритму SUS (график с меткой G ZF) достигает среднего значения СЭ 8 бит/сек/Гц, прекодер ZF со случайным выбором абонентов достигает среднего значения СЭ 5 (см. рисунок 1а) и 4,5 (см. рисунок 1б) бит/сек/Гц при 16 антеннах на БС. Число обусловленности канала для первого случая $CN = 240$, а для второго – $CN = 500$, т. е. при большей пространственной корреляции.

Сравнение суммарной СЭ прекодирования ZF и выбора абонентов по методу SUS для различного числа пользователей, используемых для выбора, представлено на рисунке 2. Набор состоит из 4-х и 8-и пользователей. При увеличении их количества СЭ увеличивается, что показывает влияние алгоритма выбора абонентов на суммарную СЭ при количестве обслуживаемых пользователей большим, чем количество антенн на стороне БС.

На рисунке 3 приводится распределение суммарной СЭ в случае без прекодирования, при прекодировании ZF для случайного выбора абонентов, при прекодировании ZF с выбором по алгоритму SUS (SUS ZF) и выбором по алгоритму поглощения (Greedy ZF). Для подмножества 8-и пользователей, выбираемых из общего множества 40 пользователей. Число обусловленности канала $CN = 140$.

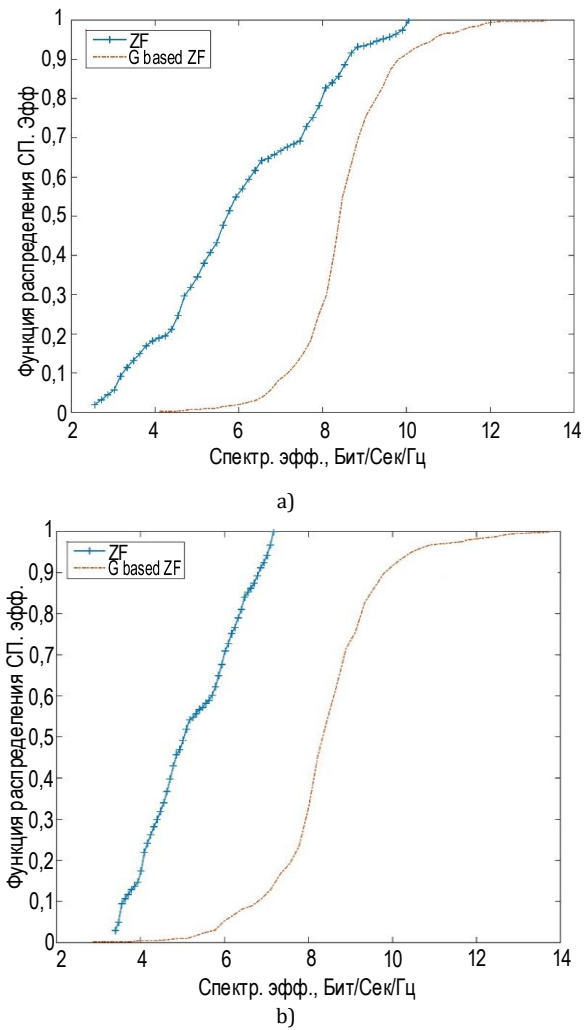


Рис. 1. Распределение СЭ при прекодировании ZF и выборе абонентов SUS, число обусловленности канала $CN = 240$ (а) и $CN = 500$ (б)

Fig. 1. Distribution of Sum Rate for ZF Precoding and User Selection SUS for Condition Number $CN = 240$ (a) and $CN = 500$ (b)

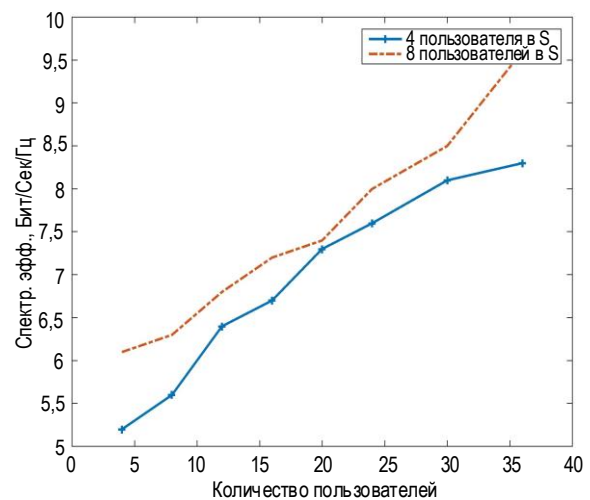


Рис. 2. Сравнение суммарной СЭ прекодирования ZF для различного числа пользователей

Fig. 2. Comparison of Sum Rate using ZF Precoding for Different Number of Users

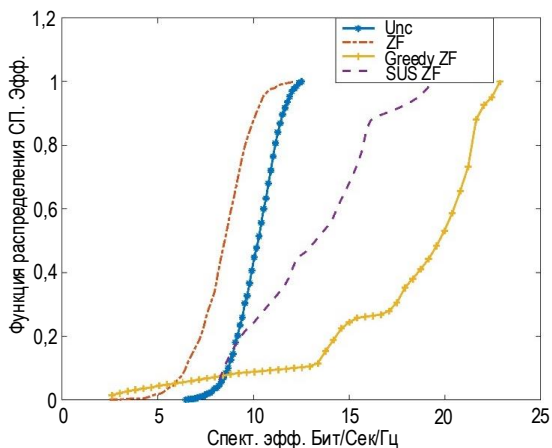


Рис. 3. Распределение СЭ при прекодировании ZF и выборе абонентов SUS, Greedy

Fig. 3. Distribution of Sum Rate for ZF Precoding and User Selection SUS, Greedy

В данных условиях распространения средняя СЭ системы без прекодирования оказалась выше СЭ прекодирования ZF и случайным выбором абонентов. Алгоритм поглощения показывает большую СЭ по сравнению с алгоритмом SUS.

На рисунке 4 представлено сравнение полученной СЭ для двух способов выбора абонентов в зависимости от количества обслуживаемых БС абонентов.

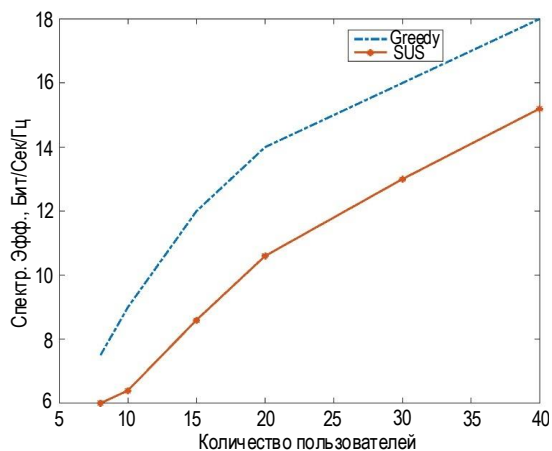


Рис. 4. Сравнение СЭ при прекодировании ZF и выборе абонентов SUS и Greedy

Fig. 4. Comparison of Sum Rate using ZF Precoding for User Selection SUS and Greedy

Список источников

1. Bjornson E., Hoydis J., Sanguinetti L. Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency // Foundations and Trends in Signal Processing. 2017. Vol. 11. Iss. 3–4. PP. 154–655. DOI:10.1561/2000000093
2. Castaneda E., Silva A., Gameiro A., Kountouris M. An Overview on Resource Allocation Techniques for Multi-User MIMO Systems // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2017. Vol. 19. Iss. 1. PP. 239–284. DOI:10.1109/COMST.2016.2618870
3. ETSI TS 38.211 V15.8.0 (2020-01). 5G; NR; Physical channels and modulation.
4. Bayesteh A., Khandani A.K. On the User Selection for MIMO Broadcast Channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2008. Vol. 54. Iss. 3. PP. 1086–1107.
5. Yoo T., Goldsmith A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2006. Vol. 24. Iss. 3. PP. 528–541. DOI:10.1109/JSAC.2005.862421
6. Dimic G., Sidiropoulos N.D. On downlink beamforming with greedy userselection: Performance analysis and a simple new algorithm // IEEE Transactions on Signal Processing. 2005. Vol. 53. Iss. 10. PP. 3857–3868. DOI:10.1109/TSP.2005.855401

При увеличении количества абонентов K алгоритм Greedy ZF показывает заметный выигрыш в получаемой СЭ по сравнению с алгоритмом SUS.

Заключение

В статье представлены результаты моделирования алгоритма прекодирования ZF с выбором абонентов. Характер изменения СЭ определяется текущей пространственной корреляцией в канале, численно отображаемой величиной чисел обусловленности. Для указанного сценария распространения и параметров моделирования по полученным реализациям каналов пользователей прекодер ZF с выбором абонентов SUS показывает большую СЭ по сравнению с прекодированием ZF и случайным выбором абонентов. СЭ увеличивается при увеличении количества выбираемых пользователей при количестве обслуживаемых пользователей больше, чем количество антенн на стороне БС. При увеличении количества абонентов K алгоритм Greedy ZF показывает выигрыш в получаемой СЭ по сравнению с алгоритмом SUS.

Представленные результаты были получены в предположении равенства средних значений отношения сигнал/шум всех пользователей, что является следствием применения нормирования векторов канала при моделировании. При этом у выбранных пользователей реализуются равные значения средних спектральных эффективностей. При системном моделировании совместно с алгоритмом планирования следует учесть потери на распространение и различие средних отношений сигнал/шум пользователей.

Представленные результаты получены при условии статичности абонентов, для дальнейшего изучения свойств прекодирования и выбора абонентов необходимо включить в условия распространения перемещение абонентов, что приведет к появлению дополнительных ошибок при оценке канала, увеличению скорости изменения свойств канала и изменению получаемой спектральной эффективности. Также для дальнейшего изучения свойств метода выбора абонентов целесообразно провести моделирование более сложных алгоритмов прекодирования BD и регуляризованных алгоритмов.

7. Kaltenberger F., Gespert D., Knopp R., Kountouris M. Performance of Multi-User MIMO Precoding with Limited Feedback over Measured Channels // Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM 2008, New Orleans, USA, 30 November–04 December 2008). IEEE, 2008. DOI:10.1109/GLOCOM.2008.ECP.738
8. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. John Wiley and Sons, 2010. 544 p.
9. ETSI TR 138.901 V16.1.0 (2020-11). 5G; Study on channel model for frequencies from 0,5 to 100 GHz.
10. Clerckx B., Kim G., Sung J. Correlated Fading in Broadcast MIMO Channels: Curse or Blessing? // Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM 2008, New Orleans, USA, 30 November–04 December 2008). IEEE, 2008. DOI:10.1109/GLOCOM.2008.ECP.735
11. Jaeckel S., Raschkowski L., Börner K., Thiele L., Burkhardt F., Eberlein E. Quasi Deterministic Radio Channel Generator. User Manual and Documentation. QuaDRiGa. Document Revision: v2.2.0. Berlin: Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, 2019.
12. Jaeckel S., Raschkowski L., Börner 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

References

1. Bjornson E., Hoydis J., Sanguinetti L. Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency. *Foundations and Trends in Signal Processing*. 2017;11(3–4):154–655. DOI:10.1561/20000000093
2. Castaneda E., Silva A., Gameiro A., Kountouris M. An Overview on Resource Allocation Techniques for Multi-User MIMO Systems. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2017;19(1):239–284. DOI:10.1109/COMST.2016.2618870
3. ETSI TS 38.211 V15.8.0 (2020-01). 5G; NR; Physical channels and modulation.
4. Yoo T., Goldsmith A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2006;24(3):528–541. DOI:10.1109/JSAC.2005.862421
5. Dimic G., Sidiropoulos N.D. On downlink beamforming with greedy userselection: Performance analysis and a simple new algorithm. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2005;53(10):3857–3868. DOI:10.1109/TSP.2005.855401
6. Dimic G., Sidiropoulos N.D. On downlink beamforming with greedy userselection: Performance analysis and a simple new algorithm. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2005;53(10):3857–3868. DOI:10.1109/TSP.2005.855401
7. Kaltenberger F., Gespert D., Knopp R., Kountouris M. Performance of Multi-User MIMO Precoding with Limited Feedback over Measured Channels. *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM 2008, 30 November–04 December 2008, New Orleans, USA*. IEEE; 2008. DOI:10.1109/GLOCOM.2008.ECP.738
8. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. John Wiley and Sons; 2010. 544 p.
9. ETSI TR 138.901 V16.1.0 (2020-11). 5G; Study on channel model for frequencies from 0,5 to 100 GHz.
10. Clerckx B., Kim G., Sung J. Correlated Fading in Broadcast MIMO Channels: Curse or Blessing? *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM 2008, 30 November–04 December 2008, New Orleans, USA*. IEEE; 2008. DOI:10.1109/GLOCOM.2008.ECP.735
11. Jaeckel S., Raschkowski L., Börner K., Thiele L., Burkhardt F., Eberlein E. Quasi Deterministic Radio Channel Generator. User Manual and Documentation. QuaDRiGa. Document Revision: v2.2.0. Berlin: Fraunhofer Heinrich Hertz Institute; 2019.
12. Jaeckel S., Raschkowski L., Börner 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


Статья поступила в редакцию 10.02.2023; одобрена после рецензирования 23.03.2023; принята к публикации 18.04.2023.

The article was submitted 10.02.2023; approved after reviewing 23.03.2023; accepted for publication 18.04.2023.

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>