

# Анализ характеристик алгоритмов прекодирования сигналов в MU-MIMO системе с использованием модели канала QuaDRiGa

А.А. Калачиков<sup>1</sup>, Р.О. Безгодкин<sup>1</sup>, И.А. Петров<sup>1</sup>, А.А. Винников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
Новосибирск, 630102, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: 330rts@gmail.com

## Информация о статье

Поступила в редакцию 10.11.2021

Поступила после рецензирования 12.02.2022

Принята к публикации 14.02.2022

**Ссылка для цитирования:** Калачиков А.А., Безгодкин Р.О., Петров И.А., Винников А.А. Анализ характеристик алгоритмов прекодирования сигналов в MU-MIMO системе с использованием модели канала QuaDRiGa // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 1. С. 41–47. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-1-41-47

**Аннотация:** В статье представлен анализ характеристик алгоритмов прекодирования сигналов в многоантенной системе со многими пользователями (MU-MIMO). Рассматриваются алгоритм прекодирования ZF и алгоритм с использованием векторов прекодирования на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) в практических условиях работы сети связи на основе модели канала QuaDRiGa, учитывающей реальные условия распространения сигналов. Полученные в модели реализации канала используются для вычисления величин отношения сигнал/шум и спектральной эффективности каждого пользователя с применением весовых векторов прекодирования, вычисленных по методу ZF и кодовых векторов ДПФ. Использование кодовых векторов ДПФ основано на квантовании измеренной импульсной характеристики канала и передаче информации о квантованном канале в виде нормы проекции вектора канала на выбранное кодовое слово и индекса этого слова по каналу обратной связи. Характеристики прекодирования в виде суммарной эргодической спектральной эффективности сравниваются на модели канала для двух способов прекодирования в каналах с пространственной корреляцией. Численное моделирование показывает, что более простая схема кодовых векторов ДПФ позволяет получить большую компенсацию интерференции в коррелированных каналах, чем схема ZF, и повысить спектральную эффективность.

**Ключевые слова:** 5G new radio, QuaDRiGa 3GPP модель канала, прекодирование ZF, прекодирование ДПФ, многоантенная система с многими пользователями (MU-MIMO).

## 1. Введение

Спектральная эффективность многоантенной системы связи со многими пользователями (MU-MIMO – аббр. от англ. Multiple-User Multiple-Input and Multiple-Output) является основным параметром в беспроводных технологиях любого поколения. В стандарте 5G NR значительное увеличение спектральной эффективности достигается применением технологии с большим количеством антенн на стороне базовой станции (БС) [1]. Прекодирование сигналов пользователей позволяет снизить взаимную интерференцию в MU-MIMO системе и повысить суммарную спектральную эффективность. Количество антенн на стороне БС превышает количество обслуживаемых пользователей данной ячейки сети (соты).

Основные результаты по изучению характеристик прекодирования в MU-MIMO системах получены на модели канала с релейскими замираниями. На практике канал является пространственно-коррелированным, что оказывает большое влияние на характеристики прекодирования и суммарную спектральную эффективность. Для изучения характеристик прекодирования в условиях реальных каналов проводятся измерения распространения сигналов в каналах и строятся модели каналов, отражающих реальные условия распространения сигналов [2].

Для системного моделирования на уровне соты и решения задач оптимального распределения ресурсов системы необходимо определять характери-

стики прекодирования на модели канала, отображающего реальные условия распространения. Модель канала 3D QuaDRiGa (*акроним от англ. QUASi Deterministic RadIo channel GenerAtor*), разработанная в институте Фраунгофера (ФРГ), позволяет выполнять моделирование системы в различных стандартных условиях построения ячеек сети [3].

В данной работе представлены результаты численного моделирования двух видов алгоритмов прекодирования в MU-MIMO системе при городском сценарии построения сети с малым размером ячейки (Urban micro) с использованием модели канала QuaDRiGa.

## II. Описание алгоритмов моделирования

### A. Модель системы связи

Система связи с многими пользователями состоит из БС, оборудованной  $N_T$  антеннами, и  $K$  пользователей с  $N_R$  антеннами, в основном  $N_R = 1$ .

При использовании прекодирования передаваемые антеннами БС символы являются суммой векторов символов пользователей, умноженных на матрицу прекодирования  $\mathbf{W}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times N_R}$ . Импульсная характеристика канала пользователя  $k$  описывается вектором комплексных коэффициентов  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ . Вектор передаваемого сигнала  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$  вычисляется в виде  $\mathbf{x}_k = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k s_k$ , где  $s_k$  – передаваемый символ пользователя  $k$ ;  $\mathbf{W}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$  – вектор прекодирования пользователя  $k$  (вектор весов).

Принятый символ на временном интервале  $n$  и поднесущей  $s$  для пользователя  $k$  описывается как:

$$y_{k,n,s} = \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{k,n,s} s_k + n_{k,n,s},$$

где  $k = 1 \dots K$ ,  $\mathbf{n}_{k,n,s}$  – аддитивный гауссовский шум с нулевым средним значением и дисперсией  $\sigma_n^2$ .

Предполагается, что импульсная характеристика канала каждого пользователя точно известна. Матрица канала системы MU-MIMO составляется из векторов-столбцов коэффициентов передачи  $\mathbf{h}_k$  для каждого пользователя и записывается в виде:

$$\mathbf{H}_{n,s} = [\mathbf{h}_{1,n,s}, \mathbf{h}_{2,n,s}, \dots, \mathbf{h}_{K,n,s}]^T,$$

и принятый вектор определяется по выражению:

$$\mathbf{y}_{n,s} = \mathbf{H}_{n,s}^T \mathbf{x}_{n,s} + \mathbf{n}_{n,s}.$$

При использовании прекодирования принятый сигнал пользователя  $k$  запишется в следующем виде  $y_{k,n,s} = \mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k s_k + \sum_{j \neq k} \mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_j s_j + n_k$ , слагаемые под знаком суммы представляют сигнал интерференции для текущего пользователя  $k$  от других пользователей [4].

Прекодирование на передающей стороне применяется для снижения интерференции между поль-

зователями и повышения суммарной спектральной эффективности MU-MIMO системы при определенных условиях распространения сигналов. Суммарная спектральная эффективность (SINR, *аббр. от англ. Signal to Interference + Noise Ratio*) вычисляется по всем пользователям и зависит от величины отношения сигнал/(интерференция + шум) каждого пользователя.

Величина SINR для пользователя  $k$  на каждой поднесущей вычисляется по выражению:

$$\text{SINR}_k = \frac{|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j \neq k} \mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_j + \frac{K\sigma^2}{P}}. \quad (1)$$

Суммарная спектральная эффективность по всем пользователям вычисляется как:

$$R_{BF} = \sum_k (\log_2 (1 + \text{SINR}_k)), \text{ бит/сек/Гц}. \quad (2)$$

Величина суммарной спектральной эффективности используется в качестве метрики для оценивания качества алгоритмов прекодирования.

### B. Алгоритм прекодирования по алгоритму ZF

Алгоритм прекодирования ZF (*аббр. от англ. Zero Forcing* – обнуление сигналов интерференции) снижает интерференцию между пользователями и повышает величину SINR<sub>k</sub> пользователей. При вычислении весовых векторов прекодирования используется псевдообращение матрицы канала. Вектор прекодирования  $\mathbf{w}_k$  пользователя  $k$  ортогонален векторам канала всех остальных пользователей  $\mathbf{h}_j^T \mathbf{w}_k = 0, j \neq k$ . Матрица прекодирования  $\mathbf{W}_{ZF}$  состоит из столбцов-векторов прекодера каждого пользователя и вычисляется как псевдообращение матрицы канала  $\mathbf{H}_{n,s}$  как  $\mathbf{W}_{ZF} = \mathbf{H}_{n,s} (\mathbf{H}_{n,s}^H \mathbf{H}_{n,s})^{-1}$ , показатель степени  $H$  обозначает эрмитово сопряжение. В реальных системах связи матрица канала  $\mathbf{H}_{n,s}$  оценивается по поднесущим с пилот сигналами и в данной работе предполагается полностью известной на стороне БС. Многочисленные измерения распространения сигналов в радиоканале MIMO показывают, что реальные каналы обладают значительной пространственной корреляцией [3]. В таких каналах элементы матрицы  $\mathbf{H}_{n,s}$  взаимно коррелированы и определяют параметры системы связи MU-MIMO, отличающиеся от случая с некоррелированным каналом. В таких коррелированных каналах вычисление обратной матрицы канала может быть затруднительно, так как матрица канала становится слабо обусловленной. Это означает, что минимум одно собственное значение матрицы  $\mathbf{H}_{n,s} \mathbf{H}_{n,s}^H$  является большой величиной, что приводит к увеличению уровня шума в одном из пространственных каналов. При этом характеристики прекодирования по алгоритму ZF могут снижать эффективность в данных условиях распространения [5].

### С. Алгоритм прекодирования по методу кодовых книг ДПФ

В прекодировании по методу кодовых книг на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) вектор прекодирования выбирается из фиксированного набора заранее вычисленных кодовых слов, которые составляют кодовую книгу. Данный метод прекодирования менее сложен, чем прекодирование по алгоритму ZF и использует информацию о состоянии канала, полученную через канал обратной связи со стороны абонента. Абонент оценивает канал, вычисляет индекс вектора в кодовой книге и норму произведения вектора прекодирования и вектора канала [1, 6]. Эти величины передаются на БС для формирования сигнала с использованием прекодирования.

Кодовые книги векторов прекодирования ДПФ могут быть рассчитаны для произвольного количества антенн БС [7]. Кодовая книга ДПФ  $\mathbf{C}_{BF}$  – это матрица, состоящая из  $N_{CB}$  кодовых векторов для  $N_T$  передающих антенн БС, описывается в виде  $\mathbf{C}_{BF} = [\mathbf{w}_1 \dots \mathbf{w}_{N_{CB}}]$ , где кодовый вектор  $\mathbf{w}_i$  вычисляется в виде:

$$\mathbf{w}_i = \frac{1}{\sqrt{N_T}} \left[ 1 e^{j\frac{2\pi}{N_{CB}}i} \dots e^{j\frac{2\pi}{N_{CB}}(N_T-1)i} \right]. \quad (3)$$

Абонент  $k$  после оценивания канала выбирает кодовый вектор  $\mathbf{w}_k$  из кодовой книги  $\mathbf{C}_{BF}$  по принципу максимума нормы  $\mathbf{w}_k = \operatorname{argmax} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_i|^2$ . Индекс выбранного вектора и величина нормы как показатель качества канала (CQI, аббр. от англ. Channel Quality Indicator) по каналу обратной связи передаются на БС для прекодирования передаваемого символа.

### Д. Модель канала MIMO QuaDRiGa

Для определения характеристик алгоритмов прекодирования MU-MIMO в условиях соответствующих сценариям реального построения сети 5G NR, используются модели каналов связи. Вероятностная модель канала связи QuaDRiGa является моделью с открытым исходным кодом, позволяющая выполнять моделирование сети связи на системном уровне, и соответствует требованиям стандарта 3GPP 38.901 на построение моделей каналов связи и основана на использовании результатов многочисленных компаний по измерению параметров радиоканала в различных условиях [8]. Пакет моделирования QuaDRiGa разработан как система моделирования для MATLAB или Octave. Пакет предназначен для генерации реалистичных импульсных характеристик радиоканала с целью моделирования сетей мобильной радиосвязи на системном уровне.

Параметры модели канала задаются в соответствии с заданным сценарием распространения сигналов. Параметры потерь распространения и

мелкомасштабных замираний канала статистически генерируются для каждой реализации канала. Основные параметры моделирования системы связи определяются перед генерированием реализаций канала. Размещение БС, конфигурация антенн, траектория движения пользователей и соответствующие сценарии распространения сигналов задаются в виде исходных параметров. Генерирование реализаций канала состоит из формирования крупномасштабных параметров (рассеяние задержек лучей и угловое рассеяние) и положения рассеивающих кластеров в пространстве [8]. Многолучевые каналы с замираниями формируются для каждого абонента в соответствии с распределением рассеивающих кластеров. Случайные значения задержек и углового рассеяния для многолучевых компонент формируются из заданных распределений. Коэффициенты канала соответствуют временным и пространственным параметрам результатов измерений каналов, заданных в виде параметров модели.

Количественной характеристикой, показывающей свойства канала для реализации алгоритмов пространственного мультиплексирования и прекодирования, является число обусловленности канала  $D$ . Данное число может быть вычислено как отношение максимального и минимального собственных чисел произведения  $\mathbf{H}_{n,s} \mathbf{H}_{n,s}^H$ . Малые значения числа обусловленности показывают возможность реализации пространственного мультиплексирования, возможность организации нескольких пространственных каналов в данных условиях распространения. В идеальном некоррелированном канале число обусловленности  $D$  равно 1. Большие значения числа обусловленности отражают условия распространения с небольшим количеством переотражателей в пространстве, с малым угловым рассеянием сигналов, что приводит к повышению пространственной корреляции между коэффициентами передачи канала.

### III. Результаты моделирования

Характеристики схем прекодирования оцениваются по величине эргодической суммарной спектральной эффективности, используя имитационное моделирование. Параметры моделирования показаны в таблице 1. По полученным характеристикам частотных характеристик канала  $\mathbf{H}_n(f, t)$  можно оценить удельную спектральную эффективность  $\bar{C}(f, t)$  узкополосной системы связи MIMO на выбранной поднесущей  $f$ , при условии равномерного распределения мощности на передающей стороне по всем антеннам (4), где  $\mathbf{I}_m$  – единичная матрица;  $\rho$  – среднее отношение сигнал/шум на каждой приемной антенне;  $\mathbf{H}_n(f, t)$  – нормированная матрица комплексных коэффициентов передачи канала абонентов для частоты  $f$ ;  $(\cdot)^H$  – операция комплексного сопряжения и транспонирования.

$$\bar{c}(f, t) = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} \left\{ \log_2 \left( \det \left( \mathbf{I}_m + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}_{n,s}(f, t) \mathbf{H}_{n,s}^H(f, t) \right) \right) \right\}. \quad (4)$$

ТАБЛИЦА 1. Параметры моделирования

TABLE 1. Simulation Parameters

Параметры моделирования	
Модель канала	QuaDRiGa version 2.2
Рассматриваемый сценарий	3GPP 38.901 UMiNLoS
Центральная частота	3,6 ГГц
Количество кластеров	12
Количество поднесущих	400
Полоса частот	12 МГц
Количество антенн БС	16
Количество кодовых слов ДПФ	64

Коэффициенты передачи канала могут быть коррелированными или некоррелированными в зависимости от расстояния между антенными элементами, условий распространения, наличия преотражателей в среде распространения. Пространственная корреляция снижает ранг матрицы канала ММО и влияет на пропускную способность канала.

В соответствии параметрами сценария Urban Micro (микросота в условиях городской застройки) пользователи равномерно распределены в области порядка 500 м от передатчика БС (рисунок 1).

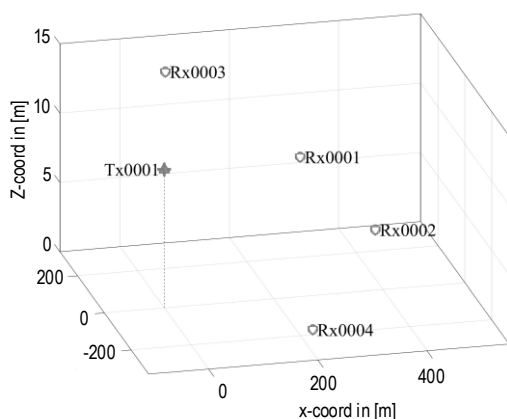


Рис. 1. Распределение БС и абонентов в пространстве при моделировании

Fig. 1. Spatial Distribution of BS and UEs

Генерируемые коэффициенты канала для данного пользователя и антенны БС состоят из многолучевых компонент. Частотная характеристика вычисляется в полосе 12 МГц по 400 поднесущим передаваемого OFDM-сигнала (аббр. от англ. Orthogonal Frequency Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением), ширина полосы поднесущей 30 кГц. Для каждой подне-

сущей производится вычисление весового вектора по алгоритму ZF или выбирается кодовое слово из кодовой книги  $\mathbf{C}_{BF}$ . Вектор канала для каждого пользователя и вектор прекодера нормализуются к единичной мощности. Мощность передатчика  $P = 1$ , дисперсия шума выбирается равной  $1/\sigma^2 = 8$  дБ, что соответствует величине отношения сигнал/шум у приемника абонента.

Результаты моделирования показаны на рисунках 2–5. На рисунке 2 показано распределение числа обусловленности  $D$  (отношения максимального и минимального собственных чисел) матрицы  $\mathbf{H}_{n,s} \mathbf{H}_{n,s}^H$  с максимальным значением, равным 16. На рисунке 3 показано распределение эргодической спектральной эффективности моделируемой системы при отсутствии прекодирования, прекодировании ZF и ДПФ в данных условиях распространения. При отсутствии прекодирования использовалось выражение (4), при прекодировании вычисления велись в соответствии с выражениями (1–3).

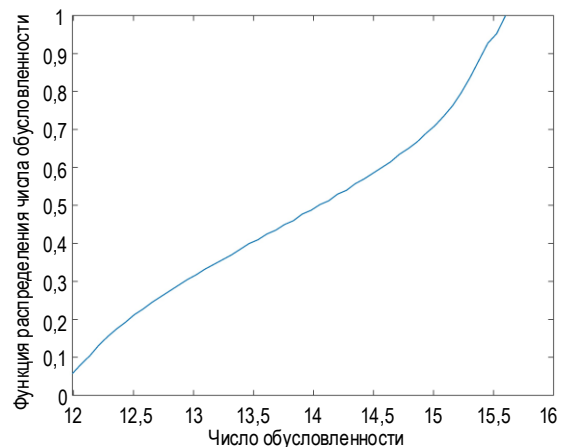


Рис. 2. Распределение числа обусловленности, максимум  $D = 16$

Fig. 2. Distribution of Condition Numbers, max  $D = 16$

При данных условиях распространения применение прекодера ZF позволяет получить большую спектральную эффективность по сравнению с прекодированием ДПФ и с отсутствием прекодирования. Для полученных реализаций канала средняя спектральная эффективность при отсутствии прекодирования примерно равна 5,6, прекодирование ДПФ – 7,0, прекодирование ZF – 8,8 (бит/сек)/Гц при 16 антенн на БС.

На рисунке 4 показано распределение числа обусловленности  $D$  матрицы  $\mathbf{H}_{n,s} \mathbf{H}_{n,s}^H$  с максимальным значением, равным 250.

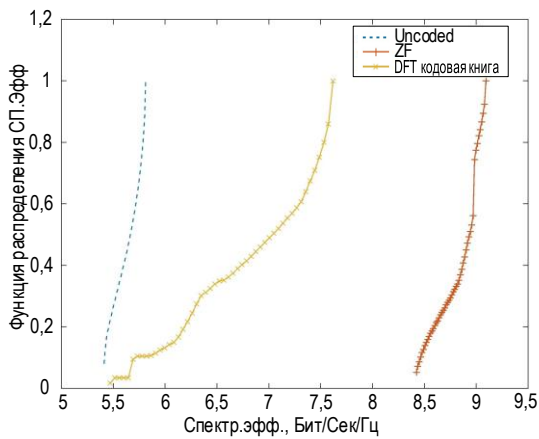


Рис. 3. Распределение эргодической спектральной эффективности,  $D = 16$

Fig. 3. Distribution of Sum Rate for Uncoded System, ZF and DFT Precoding for  $D = 16$

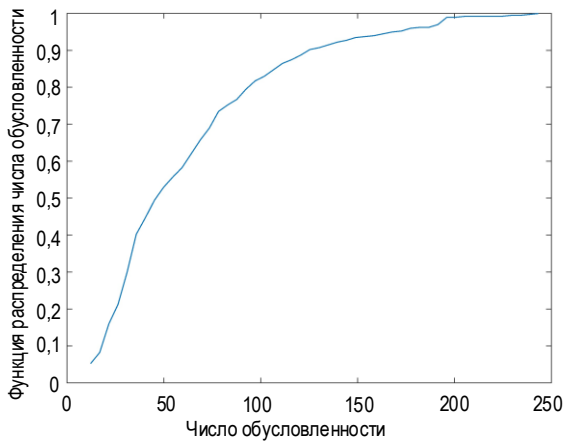


Рис. 4. Распределение числа обусловленности, максимум  $D = 250$

Fig. 4. Distribution of Condition Numbers, max  $D = 250$

На рисунке 5 показано распределение эргодической спектральной эффективности моделируемой системы при отсутствии прекодирования, с использованием прекодирования ZF и ДПФ в данных условиях распространения.

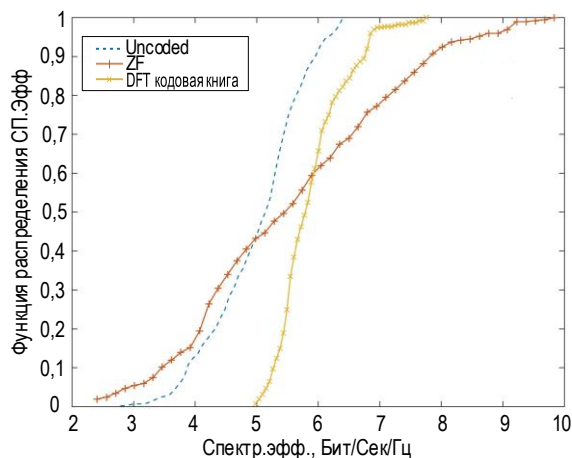


Рис. 5. Распределение эргодической спектральной эффективности,  $D = 250$

Fig. 5. Distribution of Sum Rate for Uncoded System, ZF and DFT Precoding for  $D = 250$

Для полученных реализаций канала средняя спектральная эффективность при отсутствии прекодирования примерно равна 5.0, спектральная эффективность с прекодированием ZF – 5.2 и с прекодированием кодовых книг ДПФ – 5.7 (бит/сек)/Гц при 16 антеннах на БС.

На рисунке 6 показано распределение числа обусловленности  $D$  матрицы  $\mathbf{H}_{n,s} \mathbf{H}_{n,s}^H$  с максимальным значением, равным 600.

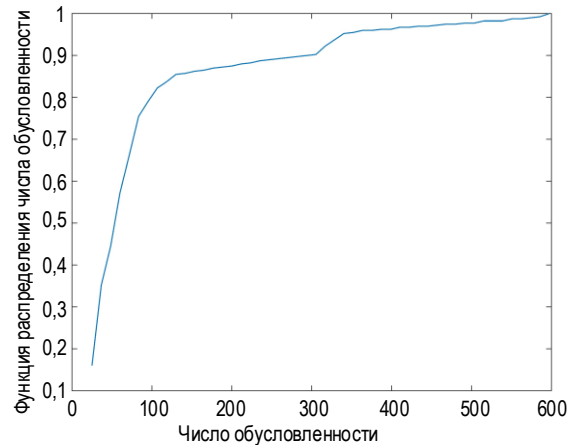


Рис. 6. Распределение числа обусловленности, максимум  $D = 600$

Fig. 6. Distribution of Condition Numbers, max  $D = 600$

На рисунке 7 показано распределение эргодической спектральной эффективности моделируемой системы при отсутствии прекодирования, при использовании алгоритмов прекодирования ZF и ДПФ в данных условиях распространения.

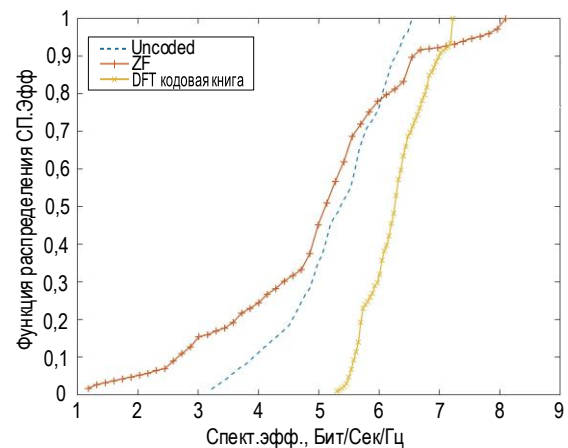


Рис. 7. Распределение эргодической спектральной эффективности,  $D = 600$

Fig. 7. Distribution of Sum Rate for Uncoded System, ZF and DFT Precoding for  $D = 600$

Для данных условий распространения с плохо обусловленным каналом и с наличием большой пространственной корреляции прекодер ZF показывает снижение спектральной эффективности даже по сравнению со случаем без применения прекодирования. Для полученных реализаций канала средняя спектральная эффективность с прекодированием ZF

составляет 5.0, при отсутствии прекодирования примерно равна 5.3, с использованием прекодирования ДПФ – 6.0 (бит/сек)/Гц при 16 антенн на БС.

В каналах с плохой обусловленностью прекодер ДПФ показывает большую устойчивость по сравнению с прекодером ZF и может быть выбран для использования алгоритмом планирования, что подтверждается и другими работами [9, 10].

#### IV. Заключение

Модель канала связи QuaDRiGa позволила эффективно провести моделирование системы связи с многими пользователями и численно изучить характеристики алгоритмов прекодирования; использовалась возможность выбрать параметры антенн БС и условия распространения в соответствии со

стандартом 3GPP 38.901. Полученные реализации канала MU-MIMO отражают реальные условия распространения сигналов и наличие пространственной корреляции. Численное моделирование проведено при условии наличия полной информации о канале связи на стороне БС и подтверждает, что наличие пространственной корреляции, выраженное числом обусловленности матрицы канала, снижает спектральную эффективность системы связи. При большой пространственной корреляции прекодер ZF показывает снижение спектральной эффективности даже по сравнению со случаем без применения прекодирования. Прекодирование по методу кодовых книг ДПФ обладает более устойчивыми характеристиками при повышении уровня коррелированности канала.

#### Список используемых источников

1. ETSI TS 138 211 V.15.8.0 (2020-01). 5G. NR. Physical channels and modulation. 3GPP TS 38.211 version 15.8.0 Release 15. Technical Specification.
2. Bengtsson E.L., Rusek F., Malkowsky S., Tufvesson F., Karlsson P.C., Edfors O. A Simulation Framework for Multiple-Antenna Terminals in 5G Massive MIMO Systems // IEEE Access. 2017. Vol. 5. PP. 26819–26831. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2775210
3. 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
4. Kaltenberger F., Gespert D., Knopp R., Kountouris M. Performance of Multi-User MIMO Precoding with Limited Feedback over Measured Channels // Proceedings of the Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM 2008, New Orleans, USA, 30 November–4 December 2008). IEEE, 2008. DOI:10.1109/GLOCOM.2008.ECP.738
5. 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:10.1561/20000000093
6. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. John Wiley and Sons, 2010. 544 p.
7. Clerckx B., Kim G., Sung J. Correlated Fading in Broadcast MIMO Channels: Curse or Blessing? // Proceedings of the Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM 2008, New Orleans, USA, 30 November–4 December 2008). IEEE, 2008. DOI:10.1109/GLOCOM.2008.ECP.735
8. 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.
9. Rebato M., Rose L., Zorzi M. Performance Assessment of MIMO Precoding on Realistic mmWave Channels // Proceedings of the International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops, Shanghai, China, 20–24 May 2019). IEEE, 2019. DOI:10.1109/ICCW.2019.8756788
10. Ying D., Vook F.W., Thomas T.A., Love D.J., Ghosh A. Kronecker product correlation model and limited feedback codebook design in a 3D channel model // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC, Sydney, Australia, 10–14 June 2014). IEEE, 2014. DOI:10.1109/ICC.2014.6884258

\* \* \*

## Performance Evaluation of the MU-MIMO Precoding Using the QuaDRiGa Channel Model

A. Kalachikov<sup>1</sup>, R. Bezgodkin<sup>1</sup>, I. Petrov<sup>1</sup>, A. Vinnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk, 630102, Russian Federation

#### Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-1-41-47

Received 10th November 2021

Revised 12th February 2022

Accepted 14th February 2022

**For citation:** Kalachikov A., Bezgodkin R., Petrov I., Vinnikov A. Performance Evaluation of the MU-MIMO Precoding Using the QuaDRiGa Channel Model. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(1):41–47. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-1-41-47

**Abstract:** The article presents the analysis of characteristics of algorithms of signal precoding in a multi-antenna system with many users (MU-MIMO). This paper presents the numerical evaluation of the multiuser MIMO beamforming algorithms ZF and DFT codebook based on a QUADRIGA channel model, taking into account the real conditions of signal propagation. The generated channels are used to calculate SINR and the spectral efficiency values of each user using the conventional ZF and DFT beamforming codebook. The eigenvalues of the MIMO channel are important in evaluating the MU-MIMO transmission performance characteristics, such as the spectral efficiency of a precoded system. The obtained performance of MU-MIMO ZF and DFT codebook-based beamforming in spatially correlated channels are compared based on the empirical cumulative density function of the sum rate of multiple users. Spatial correlation degrades capacity performance, and in the channels, the DFT precoder has a more robust performance and outperforms the ZF precoder in spectral efficiency. Obtained results can be used by the algorithm evaluation in the system-level simulations.

**Keywords:** 5G new radio, QUADRIGA 3GPP channel model, ZF precoding, DFT codebook precoding, multiuser (MU) MIMO.


### References

1. ETSI TS 138 211 V.15.8.0 (2020-01). 5G. NR. *Physical channels and modulation*. 3GPP TS 38.211 version 15.8.0 Release 15. Technical Specification
2. Bengtsson E.L., Rusek F., Malkowsky S., Tufvesson F., Karlsson P.C., Edfors O. A Simulation Framework for Multiple-Antenna Terminals in 5G Massive MIMO Systems. *IEEE Access*. 2017;5:26819–26831. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2775210
3. 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
4. Kaltenberger F., Gespert D., Knopp R., Kountouris M. Performance of Multi-User MIMO Precoding with Limited Feedback over Measured Channels. *Proceedings of the Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM 2008, 30 November–4 December 2008, New Orleans, USA*. IEEE; 2008. DOI:10.1109/GLOCOM.2008.ECP.738
5. 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
6. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. John Wiley and Sons; 2010. 544 p.
7. Clerckx B., Kim G., Sung J. Correlated Fading in Broadcast MIMO Channels: Curse or Blessing? *Proceedings of the Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM 2008, 30 November–4 December 2008, New Orleans, USA*. IEEE; 2008. DOI:10.1109/GLOCOM.2008.ECP.735
8. 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.
9. Rebato M., Rose L., Zorzi M. Performance Assessment of MIMO Precoding on Realistic mmWave Channels. *Proceedings of the International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops, 20–24 May 2019, Shanghai, China*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/ICCW.2019.8756788
10. Ying D., Vook F.W., Thomas T.A., Love D.J., Ghosh A. Kronecker product correlation model and limited feedback codebook design in a 3D channel model. *Proceedings of the International Conference on Communications, ICC, 10–14 June 2014, Sydney, Australia*. IEEE; 2014. DOI:10.1109/ICC.2014.6884258

### Сведения об авторах:


**КАЛАЧИКОВ**  
Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, [330rts@gmail.com](mailto:330rts@gmail.com)

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


**БЕЗГОДКИН**  
Роман Олегович

лаборант НИЛ-12 Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, [bezgodkinroman@mail.ru](mailto:bezgodkinroman@mail.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-2813-7370>


**ПЕТРОВ**  
Иван Андреевич

лаборант НИЛ-12 Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, [levaplova@yandex.ru](mailto:levaplova@yandex.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-3129-4721>

**ВИННИКОВ**  
Андрей Анатольевич

лаборант НИЛ-12 Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, [andrey.vinnikov@internet.ru](mailto:andrey.vinnikov@internet.ru)

 <https://orcid.org/0000-0003-2359-0958>