

Научная статья

УДК 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-1-18-25>

EDN:IZZZMV



Численное моделирование алгоритма гибридного прекодирования в миллиметровом диапазоне с использованием модели канала с открытым исходным кодом

Александр Александрович Калачиков ✉, 330rts@gmail.com

Сергей Леонидович Ремизов, selere1@gmail.com

Иван Иванович Резван, rezvan@sibsutis.ru

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

Аннотация

Актуальность. Использование многоантенных технологий в виде прекодирования сигналов является базовым условием повышения спектральной эффективности в современных системах мобильной связи в сочетании с переходом в диапазон миллиметровых волн. Условия распространения в миллиметровом диапазоне обуславливают обязательное использование антенных решеток в системах связи для компенсации потерь распространения и направленной передачи и приема сигналов пользователей. При передаче нескольких параллельных пространственных потоков данных пользователя используется прекодирование сигналов для реализации пространственного мультиплексирования и повышения спектральной эффективности системы. Рассматривается гибридная архитектура построения многоантенной системы и прекодирования, состоящая из аналоговой и цифровой частей. Но уменьшение количества радиочастотных трактов приводит к снижению возможности пространственного мультиплексирования по сравнению с полностью цифровой системой. В связи с этим является важной задачей выбора оптимального количества радиочастотных трактов для получения максимального пространственного мультиплексирования с учетом текущих условий распространения сигналов и пространственной корреляции канала связи. **Целью** исследования является определение влияния на спектральную эффективность выбора количества используемых радиочастотных трактов в системе гибридного прекодирования.

Методы исследования заключаются в имитационном моделировании алгоритма гибридного прекодирования. Для решения задачи численного моделирования гибридного прекодирования используются реализации канала MIMO миллиметровых волн, полученные при помощи открытого программного пакета модели канала QuaDRiGa.

Результаты представлены в виде функций распределения спектральной эффективности системы гибридного прекодирования, полученные на основе реализаций канала в определенном сценарии распространения.




Новизна состоит в численном определении параметров канала многоантенной системы связи в миллиметровом диапазоне и в использовании распределения собственных чисел матриц канала, полученных в модели, для оценки количества радиочастотных трактов, требуемых для достижения максимальной в данных условиях спектральной эффективности системы связи с гибридным прекодированием.

Ключевые слова: гибридное прекодирование в миллиметровом диапазоне, модель канала QuaDRiGa 3GPP, пространственное мультиплексирование, системы связи MIMO

Ссылка для цитирования: Калачиков А.А., Ремизов С.Л., Резван И.И. Численное моделирование алгоритма гибридного прекодирования в миллиметровом диапазоне с использованием модели канала с открытым исходным кодом // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 1. С. 18–25. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-1-18-25. EDN:IZZZMV

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-1-18-25>
EDN:IZZZMV

Numerical Simulation of the Hybrid Precoding Algorithm in Millimeter Wave Band Using the Open Source Channel Model

 Alexander A. Kalachikov ✉, 330rts@gmail.com
 Sergey L. Remizov, selere1@gmail.com
 Ivan I. Rezvan, rezvan@sibsutis.ru

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

Annotation

Relevance. The use of multi-antenna technologies in the form of signal precoding is a basic condition for increasing spectral efficiency in modern mobile communication systems in combination with the transition to the millimeter wave frequency band. Propagation conditions in the millimeter wave require the use of antenna arrays in communication systems to compensate for propagation losses and directional transmission and reception of user signals. When transmitting multiple parallel spatial user data streams, signal precoding is used to implement spatial multiplexing and improve the spectral efficiency of the system. A hybrid architecture for constructing a multi-antenna system and precoding, consisting of analog and digital parts, is considered. But reducing the number of radio frequency paths leads to a decrease in the possibility of spatial multiplexing compared to a completely digital system. In this regard, it is important to select the optimal number of radio frequency paths to obtain maximum spatial multiplexing, taking into account the current conditions of signal propagation and spatial correlation of the communication channel.

The purpose of the study is to determine the effect on the spectral efficiency of the choice of the number of used radio frequency paths in a hybrid precoding system.

The research methods consist of simulation modeling of a hybrid precoding algorithm. To solve the problem of numerical modeling of hybrid precoding, implementations of a MIMO channel of millimeter waves are used, obtained using the open channel model software package QuaDRiGa.

The results are presented in the form of distribution functions of the spectral efficiency of the hybrid precoding system, obtained on the basis of channel implementations in a certain propagation scenario.

The novelty lies in the numerical determination of the channel parameters of a multi-antenna communication system in the millimeter range and the use of the distribution of eigenvalues of the obtained channel implementations to study the influence of the number of radio frequency paths on the spectral efficiency of a communication system with hybrid precoding achievable under given conditions.

Keywords: hybrid precoding, millimeter-wave (mmWave) frequency bands, QuaDRiGa 3GPP channel model, multi-stream spatial multiplexing

For citation: Kalachikov A.A., Remizov S.L., Rezvan I.I. Numerical Simulation of the Hybrid Precoding Algorithm in Millimeter Wave Band Using the Open Source Channel Model. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(1):18–25. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-1-18-25. EDN:IZZZMV

1. Введение

Постоянно растущая потребность в высокой скорости передачи данных для большого количества абонентов в современных системах мобильной связи может быть реализована с применением нескольких базовых технологий. Спектральная эффективность системы мобильной связи увеличивается

с применением многоантенной технологии ММО, реализующей пространственное мультиплексирование. Конкретное увеличение спектральной эффективности в этом случае зависит от возможности реализации пространственной обработки сигналов и максимально точного использования свойств радиоканала.

Для повышения спектральной эффективности наиболее перспективным является переход в область миллиметрового частотного диапазона 30–300 ГГц в сочетании с применением многоантенных систем большой размерности (*от англ.* massive MIMO) на стороне базовой станции (БС) и использовании нескольких антенн в мобильном терминале пользователя. Канал с многолучевым распространением в диапазоне миллиметровых волн характеризуется высокими потерями на распространение, и для компенсации этих потерь необходимо использовать антенну, состоящую из большого количества элементов (антенную решетку), и последующую обработку сигналов с антенных элементов, обеспечивающую достаточный выигрыш решетки за счет когерентного сложения сигналов. Выигрыш состоит в увеличении отношения сигнал / шум. Технология MIMO с большим количеством антенных элементов позволяет обеспечить высокий выигрыш антенной решетки и увеличить отношение сигнал / шум для возможности организации одновременной передачи нескольких потоков данных в выделенном частотно-временном ресурсе (пространственного мультиплексирования) с пространственным разделением этих потоков данных, что значительно повышает спектральную эффективность системы связи [1–3].

В современных системах мобильной связи в диапазоне частот меньше 6 ГГц прекодирование реализовано в цифровом виде, векторы прекодирования вычисляются по заданным алгоритмам и применяются для формирования передаваемого сигнала отдельно для каждого антенного элемента. Каждому антенному элементу соответствует свой канал формирования сигналов, содержащий радиочастотный (РЧ) тракт. В диапазоне миллиметровых волн такая архитектура приводит к повышению стоимости и энергопотребления. Операцию прекодирования проводят отдельно в аналоговой и цифровой форме, аналоговое прекодирование реализуют в виде фазовращателей, цифровая часть прекодирования вычисляется для выбранных аналоговых векторов. Такая архитектура позволяет использовать сокращенное число РЧ трактов в сочетании с цифровым прекодированием. Гибридное прекодирование аппроксимирует оптимальную цифровую матрицу прекодирования произведением последней и аналоговой матрицы прекодирования, реализованной на основе аналоговых фазовращателей. Аппроксимация оптимального прекодера строится по текущей структуре пространственной многолучевости радиоканала [4, 5].

В статье рассматривается задача построения системной модели для определения характеристик гибридного прекодирования в диапазоне миллиметровых длин волн, состоящей из модели канала и многоантенной системы, реализующей алгоритм

гибридного прекодирования. С использованием построенной модели системы определяются характеристики гибридного прекодирования в практических условиях развертывания системы связи с различными параметрами. Для получения реализации канала, достоверно отражающей реальные условия распространения миллиметрового диапазона, используется модель канала с открытым исходным кодом и параметрами из результатов измерений в указанных условиях распространения.

2. Модель системы

Рассматриваемая система связи использует многоантенную технологию MIMO в сочетании с OFDM-сигналом, состоящим из N_F поднесущих. БС оборудована N_T передающими антеннами, мобильный терминал (МТ) пользователя оборудован N_R приемными антеннами. При передаче нескольких пространственных слоев данных формируется N_s потоков данных. Передатчик использует N_{RF} радиотрактов, предполагается выполнение условия $N_s \leq N_{RF} \leq N_T$. Используется цифровой прекодер с матрицей прекодирования \mathbf{F}_{BB} размерностью $N_{RF} \times N_s$. Весовые векторы цифрового прекодера вычисляются для каждой поднесущей OFDM-сигнала в частотной области и применяются к вектору передаваемых символов \mathbf{s} размером $N_s \times 1$ с использованием N_{RF} радиотрактов (рисунок 1).

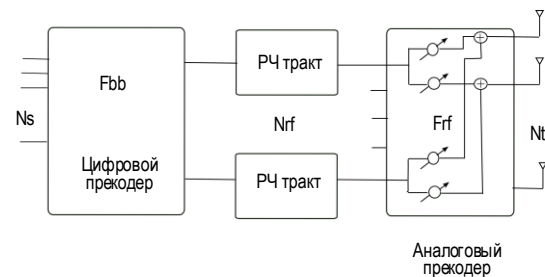


Рис. 1. Архитектура системы на основе гибридного прекодирования

Fig. 1. Architecture of Hybrid Precoder

После преобразования во временную область и переноса сигнала на несущую частоту выполняется аналоговое прекодирование. Аналоговый прекодер \mathbf{F}_{RF} размерностью $N_T \times N_{RF}$ реализован в виде набора фазовращателей и функционирует в РЧ диапазоне.

Передаваемый сигнал записывается в виде выражения:

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{s}. \quad (1)$$

При использовании полностью подключенной архитектуры каждый РЧ тракт подключается ко всем антеннам через аналоговые фазовращатели.

Принятый сигнал записывается в следующем виде:

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho} \mathbf{H} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

где \mathbf{y} – вектор принятого сигнала размером $N_R \times 1$; \mathbf{H} – матрица комплексных коэффициентов передачи канала размером $N_R \times N_T$; ρ – средняя мощность принятого сигнала; \mathbf{n} – вектор комплексного нормального шума с нулевым средним значением и дисперсией σ_n^2 [5].

2.1. Модель канала миллиметрового диапазона

Свойства распространения в радиоканале миллиметрового диапазона отличаются небольшим числом многолучевых компонент вследствие малого уровня переотражений и высокого поглощения сигналов в данном диапазоне. В пространственно-временной модели канала используется ограниченное количество переотражений и рассеивателей в среде распространения, которые формируют пути распространения, группируемые в кластеры.

Канал Н БС и МТ может быть описан в виде линейной комбинации управляющих векторов антенной решетки (векторов отклика антенной решетки) на стороне передачи и приема соответствующим

пространственным путем распространения:

$$\mathbf{H} = \sum_{l=1}^{N_p} \alpha_l \mathbf{a}_r(\varphi_l^r, \theta_l^r) \mathbf{a}_t(\varphi_l^t, \theta_l^t), \quad (3)$$

где N_p – количество путей распространения; α_l – комплексный коэффициент передачи канала, соответствующий пути l ; векторы $\mathbf{a}_r(\varphi_l^r, \theta_l^r)$ и $\mathbf{a}_t(\varphi_l^t, \theta_l^t)$ – векторы отклика антенной решетки на стороне передачи и приема для направлений приема (φ_l^r, θ_l^r) и передачи (φ_l^t, θ_l^t) путей распространения l ; угол φ_l^r – азимут принимаемого сигнала; угол θ_l^r – угол места принимаемого сигнала.

Векторы отклика антенной решетки $\mathbf{a}_r(\varphi_l^r, \theta_l^r)$ и $\mathbf{a}_t(\varphi_l^t, \theta_l^t)$ определяются структурой антенной решетки и длиной волны. Для планарной антенной решетки с равномерным расположением антенных элементов и количеством элементов по вертикали N_v и горизонтали N_h вектор антенной решетки вычисляется по выражению (4), где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; λ – длина волны; d – расстояние между антенными элементами [6].

$$\mathbf{a}(\varphi, \theta) = \frac{1}{\sqrt{N_v N_h}} [1, \dots, e^{kd((N_v-1) \sin(\varphi) \sin(\theta) + (N_h-1) \cos(\theta))}]. \quad (4)$$

2.2. Алгоритм гибридного прекодирования

Данный алгоритм гибридного прекодирования использует свойства ограниченного количества пространственных многолучевых компонент канала в диапазоне миллиметровых волн для аппроксимации оптимальной цифровой матрицы прекодирования. Текущее состояние канала в виде матрицы коэффициентов передачи \mathbf{H} предполагается известным на стороне передатчика. На практике частотная характеристика канала измеряется при помощи пилотных поднесущих в составе OFDM-сигнала.

Вычисление матриц гибридного прекодирования основано на минимизации расстояния Евклида между гибридным прекодером в виде произведения матрицы цифрового прекодирования \mathbf{F}_{BB} и матрицы аналогового РЧ прекодирования \mathbf{F}_{RF} и полностью цифровым оптимальным прекодером \mathbf{F}_{opt} , вычисленными по текущим реализациям канала \mathbf{H} .

Оптимальный прекодер вычисляется при помощи сингулярного разложения матрицы канала $\mathbf{H} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^*$, где матрицы \mathbf{U} и \mathbf{V} – левая и правая матрицы сингулярных векторов; Σ – диагональная матрица сингулярных чисел. Векторы прекодирования оптимального прекодера выбираются из

матрицы \mathbf{V} в виде подматрицы $\mathbf{F}_{opt} = \mathbf{V}_1$ размерностью $N_T \times N_s$.

Свойство разреженности канала миллиметрового диапазона позволяет выбрать компоненты аналогового прекодера \mathbf{F}_{RF} из набора векторов отклика антенной решетки, соответствующих основным многолучевым компонентам канала и в результате этого получить пространственное согласование с каналом и максимальный выигрыш антенной решетки. Выбор соответствующих векторов отклика производится через вычисление проекций векторов отклика на матрицу оптимального прекодера и выбор соответствующих N_s векторов отклика антенной решетки с максимальной величиной проекции.

После выбора N_s аналоговых векторов прекодирования вычисляются весовые векторы цифрового прекодера \mathbf{F}_{BB} . Данные векторы находятся как решение задачи по методу наименьших квадратов $\mathbf{F}_{BB} = (\mathbf{F}_{RF}^* \mathbf{F}_{RF})^{-1} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{opt}$.

Полученный гибридный прекодер $\mathbf{F}_H = \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB}$ аппроксимирует оптимальный цифровой прекодер, вычисленный по текущей реализации канала. Операция вычисления прекодирования состоит в выборе набора N_{RF} векторов отклика антенной решетки, наиболее соответствующих текущим усло-

виям распространения в многолучевом канале, согласованных с угловым рассеянием компонент в канале и нахождению их оптимальной линейной комбинации $\mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}$ с цифровыми весовыми векторами прекодирования [6].

Количество реализуемых пространственных потоков зависит от текущих условий распространения в канале. Для оценки количества независимых пространственных потоков используется распределение собственных чисел матрицы $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$; индекс матрицы \mathbf{H} обозначает комплексное сопряжение и транспонирование матрицы. Большие значения собственных чисел матрицы $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ соответствуют пространственным каналам с большим коэффициентом передачи, количество таких каналов соответствует рангу матрицы канала и может использоваться для определения числа пространственных потоков, реализуемых в данных условиях распространения [7].

В качестве критерия эффективности гибридного прекодирования в системе с MIMO используется величина спектральной эффективности. Спектральная эффективность для текущей реализации канала \mathbf{H} на выбранной поднесущей сигнала-OFDM и используемым гибридным прекодером вычисляется как (Бит/с/Гц):

$$R = \log_2 \left(\left| \mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{H}\mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}\mathbf{F}_{RF}^H\mathbf{F}_{BB}^H\mathbf{H}^H \right| \right). \quad (5)$$

Средняя спектральная эффективность вычисляется по большому числу реализаций канала [8, 9].

3. Результаты моделирования

Характеристики прекодирования определяются в виде средней спектральной эффективности, полученной в результате численного моделирования канала и вычисления весовых векторов прекодирования по полученным реализациям канала. Параметры моделирования представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Параметры моделирования

TABLE 1. Simulation Parameters

Модель канала	QuaDRiGa, версия 2.2
Сценарий развертывания	3GPP 38.901 UMi NLoS
Центральная частота	28 ГГц
Максимальное число многолучевых компонент	20
Количество поднесущих	2048
Полоса частот	400 МГц
Количество антенн БС	64
Тип антенны	Планарная антенная решетка
Количество антенн абонента	16
Количество РЧ трактов	4, 8
Отношение сигнал / шум	14 дБ

Для моделирования канала используется программный пакет с открытым исходным кодом QuaDRiGa, выпущенный в Fraunhofer HHI и реализованный на основе многочисленных измерений радиоканала в различных частотных диапазонах [10, 11]. Модель позволяет получить достоверные реализации канала для проведения моделирования различных алгоритмов обработки сигналов.

Результаты моделирования показаны на рисунках 2–4. На рисунке 2 показана функция распределения (CDF) первых четырех наибольших из 16 собственных значений матрицы $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$. Количество ненулевых собственных значений показывает ранг канала и количество собственных пространственных каналов, реализуемых в данных условиях распространения. Каждый собственный канал может осуществлять пространственную передачу для одного потока данных, и значение собственной величины определяет отношение сигнал / шум в этом пространственном канале. Наибольшие собственные значения соответствуют пространственным каналам с наибольшими коэффициентами передачи. По графику функции распределения можно определить распределение величин собственных значений, отличных от нуля. В данных условиях распространения на основе полученного множества реализаций канала количество реализуемых пространственных потоков с достаточным коэффициентом передачи не превышает трех, так как остальные собственные значения не превышают величины 0,1 в нормированном виде.

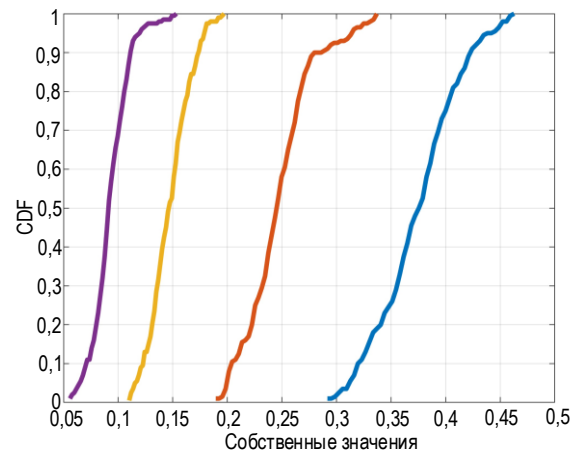


Рис. 2. Распределение наибольших четырех собственных значений

Fig. 2. CDF of First Four Maximum Eigenvalues

Рисунок 3а показывает синтезированную диаграмму направленности антенны в проекции Y–Z с применением вычисленного оптимального вектора прекодирования при передаче одного пространственного потока. Диаграмма направленности для антенной решетки – из 64 элементов, оптимальный весовой вектор прекодирования вычислен по

реализации канала с максимальным числом многолучевых компонент, равным 20. Среди этих компонент можно выделить 3–4 луча с различными направлениями и большим уровнем коэффициента передачи (4 максимума диаграммы направленности).

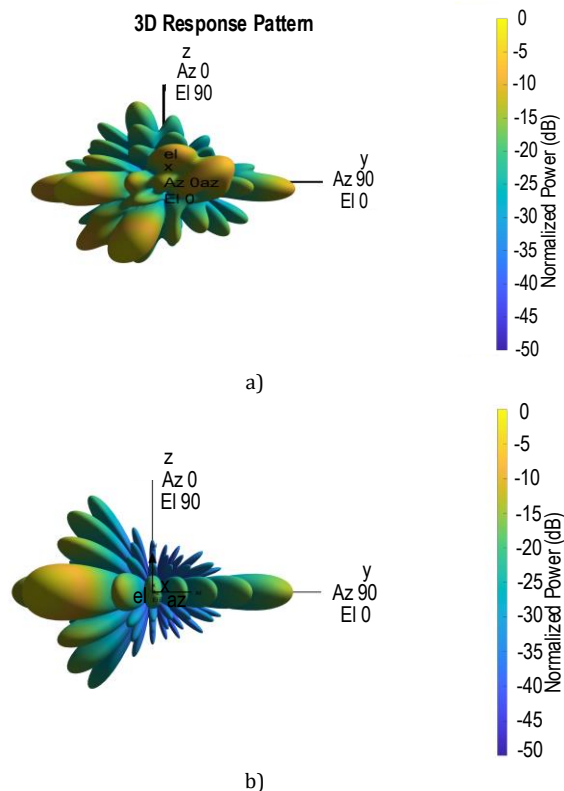


Рис. 3. Диаграммы направленности, полученные с использованием оптимального цифрового (а) и гибридного (б) прекодеров

Fig. 3. Array Pattern for Fully Digital (a) and Hybrid Precoder (b)

Гибридный прекодер [4] используется для оценки спектральной эффективности системы MIMO OFDM mmWave диапазона. Рисунок 3б показывает синтезированную диаграмму направленности антенны из 64 элементов в проекции Y–Z с применением вычисленного произведения аналогового и цифрового прекодеров по гибридной схеме при передаче одного пространственного потока. Вектор весов гибридного прекодирования вычислен по реализации канала с максимальным числом многолучевых компонент, равным 20. В данных условиях развертывания системы гибридный прекодер аппроксимирует оптимальный цифровой прекодер и полученная диаграмма направленности соответствует пространственным лучам канала, по которым выбираются компоненты аналогового прекодера с последующим вычислением их комбинации.

На рисунке 4а показаны графики функции распределения средней спектральной эффективности

для различного числа РЧ трактов в системе (при передаче двух независимых пространственных потоков для двух и четырех РЧ трактов). Оптимальный цифровой прекодер позволяет получить максимальную спектральную эффективность, аппроксимация в виде гибридного прекодера обеспечивает более низкую спектральную эффективность в этих условиях, и расстояние между кривыми больше при использовании двух РЧ трактов. В случае применения четырех РЧ трактов расстояние уменьшается, гибридный прекодер $F_{RF}F_{BB}$ дает более близкую аппроксимацию оптимального прекодера F_{opt} , так как увеличивается количество векторов отклика антенной решеткой. Это позволяет более точно выбрать вектор отклика для направления путей распространения с большим коэффициентом передачи.

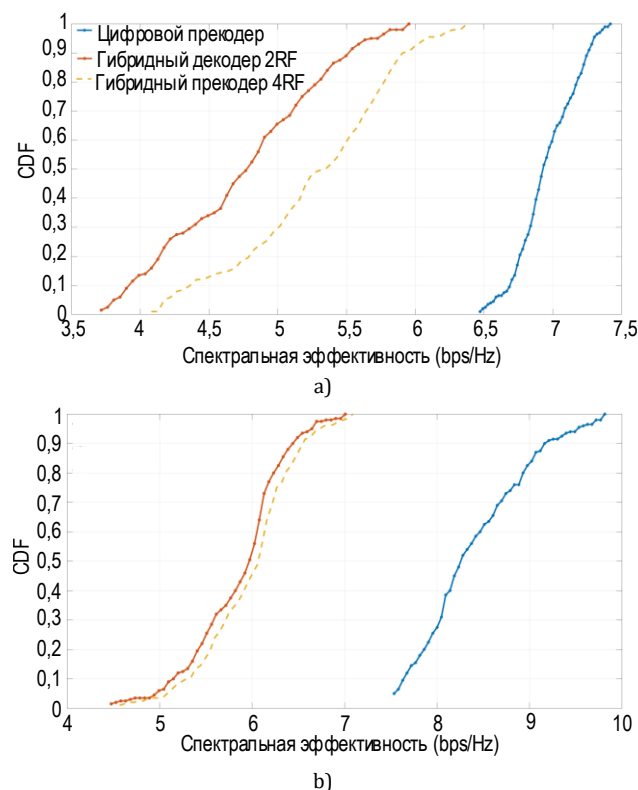


Рис. 4. Функция распределения спектральной эффективности при двух (а) и четырех (б) пространственных потоках данных

Fig. 4. CDF of the Sum Rate for Two (a) and Four (b) Spatial Layers

На рисунке 4б показана функция распределения спектральной эффективности при передаче четырех пространственных потоков и использовании 4 и 8 РЧ трактов. При таких системных параметрах при передаче четырех пространственных потоков произведение матрицы аналогового прекодера и матрицы цифрового прекодера $F_{RF}F_{BB}$ более точно аппроксимируют оптимальный прекодер и обеспечивают большую спектральную эффективность, чем система с 2 и 4 РЧ трактами. Но спектральная

эффективность гибридного прекодера при увеличении количества РЧ трактов увеличивается незначительно, т. к. количество основных путей распространения не превышает четырех, что также отражается в распределении собственных чисел.

4. Заключение

Представлены результаты численного моделирования алгоритма гибридного прекодирования в системе ММО миллиметрового диапазона. Моделирование канала миллиметрового диапазона выполнено для типового сценария малой зоны обслуживания в условиях городской застройки с использованием программного пакета QuaDRiGa. Резуль-

таты моделирования показывают, что спектральная эффективность с использованием гибридного прекодирования увеличивается, если количество пространственных потоков увеличивается, но не превышает ранга канала. Показателем количества реализуемых пространственных потоков является значения максимальных собственных чисел матрицы канала. При увеличении числа РЧ трактов спектральная эффективность увеличивается при наличии достаточного числа многолучевых компонент радиоканала с высоким коэффициентом передачи, которые соответствуют собственным числам матрицы канала.

Список источников

1. Roh W., Seol J.Y., Park J., Lee B., Lee J., Yungsoo K. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results // *IEEE Communications Magazine*. 2014. Vol. 52. Iss. 2. PP. 106–113. DOI:10.1109/MCOM.2014.6736750
2. Molisch A.F., Ratnam V.V., Han S., Li Z., Nguyen S.L.H. Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A survey // *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55. Iss. 9. PP. 134–141. DOI:10.1109/MCOM.2017.1600400
3. Носов В.И. Методы повышения помехоустойчивости систем радиосвязи с использованием технологии ММО и пространственно-временной обработки сигналов. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2014. 316 с. EDN:VRTAXT
4. Sun S., Rappaport T.S., Shafi M., Tang P., Zhang J., Smith P.J. Propagation Models and Performance Evaluation for 5G Millimeter-Wave Bands // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018. Vol. 67. Iss. 9. PP. 8422–8439. DOI:10.1109/TVT.2018.2848208. EDN:YIPMFV
5. El Ayach O., Rajagopal S., Abu-Surra S., Pi Z., Jr. Heath R.W. Spatially Sparse Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2014. Vol. 13. Iss. 3. PP. 1499–1513. DOI:10.1109/TWC.2014.011714.130846
6. Heath R.W., Gonzalez-Prelcic N., Rangan S., Roh W., Sayeed A.M. An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2016. Vol. 10. Iss. 3. PP. 436–453. DOI:10.1109/JSTSP.2016.2523924
7. Rappaport T.S., Gutierrez F., Ben-Dor E., Murdock J.N., Qiao Y., Tamir J.I. Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013. Vol. 61. Iss. 4. PP. 1850–1859. DOI:10.1109/TAP.2012.2235056
8. Sohrabi F., Yu W., Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2016. Vol. 10. Iss. 3. PP. 501–513. DOI:10.1109/JSTSP.2016.2520912
9. Payami S., Ghoraishi M., Dianati M. Hybrid beamforming for large antenna arrays with phase shifter selection // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2016. Vol. 15. Iss. 11. PP. 7258–7271. DOI:10.1109/TWC.2016.2599526
10. 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*. 2013. Vol. 62. Iss. 6. PP. 3242–3256. DOI:10.1109/TAP.2014.2310220
11. Jaeckel S., Raschkowski L., Boerner K., Thiele L., Burkhardt F., Eberlein E. QuaDRiGa – Quasi Deterministic Radio Channel Generator. User Manual and Documentation. Tech. Rep. v2.2.0. Berlin: Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, 2019.

References

1. Roh W., Seol J.Y., Park J., Lee B., Lee J., Yungsoo K. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results. *IEEE Communications Magazine*. 2014;52(2):106–113. DOI:10.1109/MCOM.2014.6736750
2. Molisch A.F., Ratnam V.V., Han S., Li Z., Nguyen S.L.H. Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A survey. *IEEE Communications Magazine*. 2017;55(9):134–141. DOI:10.1109/MCOM.2017.1600400
3. Nosov V.I. *Methods of Increasing the Noise Immunity of Radio Communication Systems Using MIMO Technology and Space-Time Signal Processing*. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics Publ.; 2014. 316 p. (in Russ.) EDN:VRTAXT
4. Sun S., Rappaport T.S., Shafi M., Tang P., Zhang J., Smith P.J. Propagation Models and Performance Evaluation for 5G Millimeter-Wave Bands. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018;67(9):8422–8439. DOI:10.1109/TVT.2018.2848208. EDN:YIPMFV
5. El Ayach O., Rajagopal S., Abu-Surra S., Pi Z., Jr. Heath R.W. Spatially Sparse Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2014;13(3):1499–1513. DOI:10.1109/TWC.2014.011714.130846

6. Heath R.W., Gonzalez-Prelcic N., Rangan S., Roh W., Sayeed A.M. An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2016;10(3):436–453. DOI:10.1109/JSTSP.2016.2523924.
7. Rappaport T.S., Gutierrez F., Ben-Dor E., Murdock J.N., Qiao Y., Tamir J.I. Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013;61(4):1850–1859. DOI:10.1109/TAP.2012.2235056
8. Sohrabi F., Yu W., Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2016;10(3):501–513. DOI:10.1109/JSTSP.2016.2520912
9. Payami S., Ghoraihi M., Dianati M. Hybrid beamforming for large antenna arrays with phase shifter selection. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2016;15(11):7258–7271. DOI:10.1109/TWC.2016.2599526
10. 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*. 2013;62(6):3242–3256. DOI:10.1109/TAP.2014.2310220
11. Jaeckel S., Raschkowski L., Boerner K., Thiele L., Burkhardt F., Eberlein E. *QuaDRiGa – Quasi Deterministic Radio Channel Generator. User Manual and Documentation. Tech. Rep. v2.2.0*. Berlin: Fraunhofer Heinrich Hertz Institute; 2019.


Статья поступила в редакцию 23.12.2024; одобрена после рецензирования 10.02.2025; принята к публикации 13.02.2025.

The article was submitted 23.12.2024; approved after reviewing 10.02.2025; accepted for publication 13.02.2025.

Информация об авторах:


КАЛАЧИКОВ
Александр Александрович

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

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


РЕМИЗОВ
Сергей Леонидович

кандидат технических наук, доцент военного учебного центра Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики

 <https://orcid.org/0009-0003-7836-2087>

РЕЗВАН
Иван Иванович

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

 <https://orcid.org/0009-0002-6875-7061>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.