

Исследование модели канала связи MIMO на основе открытого пакета моделирования

А. А. Калачиков, Р. О. Безгодкин, И. А. Петров, А. А. Винников

В данной работе проведено исследование модели радиоканала MIMO на основе открытого пакета моделирования QUADRIGA. Приводится описание модели канала и параметров модели радиоканала. Выполняется конфигурация параметров модели, приводятся результаты моделирования. Определены числовые характеристики полученных реализаций – полная корреляционная матрица канала для конфигураций 4x4 и 8x8, распределения модуля и фазы коэффициентов передачи канала. Приводятся критерии качества моделирования и результаты моделирования радиоканала для различных конфигураций антенн на передающей и приемной сторонах.

Ключевые слова: модель радиоканала MIMO, условия распространения, параметры многолучевого распространения, пропускная способность радиоканала.

1. Введение

На сегодняшний день активно развиваются беспроводные сети 4-го и 5-го поколений, а также начинается разработка сетей 6-го поколения. С каждым годом использования беспроводных сетей связи растут требования по скорости передачи данных и качеству обслуживания.

Одной из технологий, которая позволяет реализовать повышение скорости передачи данных, увеличение спектральной эффективности и повышение помехоустойчивости приёма сигналов в условиях многолучевого распространения в радиоканале, является технология MIMO (Multiple Input Multiple Output). Система связи MIMO – система, организованная антеннами на передающей и приемной сторонах радиоканала. Использование нескольких антенн позволяет повысить пропускную способность в канале с независимым многолучевым распространением и замираниями сигнала. Повышение пропускной способности во многом зависит от условий распространения сигнала и статистических свойств канала MIMO. Изучение вероятностных свойств канала MIMO необходимо для построения моделей канала, приближенных к идеальным, отражающих основные его свойства, при разработке и исследовании различных алгоритмов модуляции, кодирования и коррекции при приеме сигнала.

Модель канала является фундаментом для теоретического анализа производительности системы MIMO. С точки зрения моделирования выделяются две модели каналов – физические и аналитические. Физические модели характеризуют окружающую среду на основе распространения электромагнитных волн, такие модели позволяют воспроизводить распространение радиоволн в реальной среде. Аналитические модели характеризуют импульсную характеристику канала аналитическим и математическим способами.

Целью данной работы является экспериментальное получение реализаций канала MIMO с использованием пакета QUADRIGA в соответствии с заданным сценарием и определение основных характеристик полученных реализаций.

2. Описание канала ММО

В канале с многолучевым распространением сигнал на выходе канала представляется в виде свертки передаваемых сигналов и импульсной характеристики канала. Такой линейный канал полностью описывается системными функциями – импульсной характеристикой $h(t, \tau)$ во временной области и передаточной характеристикой $H(t, f)$ в частотной. Они могут быть постоянными или переменными во времени в зависимости от движения мобильного терминала и условий распространения.

Движение абонентов и изменение условий распространения являются случайными, поэтому импульсная характеристика канала рассматривается как случайный процесс.

Радиоканал в мобильных системах обычно является стационарным в широком смысле на интервале времени или пространственного перемещения. Функции корреляции системных функций канала не зависят от конкретного момента времени, а только от разницы моментов времени, что соответствует стационарности функции автокорреляции.

Рассеяние сигнала по переменной рассеяния τ из-за многолучевого распространения в канале численно описывается во временной области рассеянием задержек отдельных лучей T_m , в частотной области – величиной полосы когерентности канала Δf_h .

Рассеяние задержек является параметром диапазона задержек распространения многолучевых составляющих сигнала при распространении по многолучевому каналу. Определение термина рассеяния задержек основано на автокорреляционной функции импульсной характеристики канала $h(t, \tau)$. При этом многолучевой канал рассматривается как стационарный случайный процесс по переменной времени t и АКФ импульсной характеристики канала, зависит только от интервала времени между сечениями процесса.

Профиль задержки мощности $P(\tau)$ представляет собой усредненные по времени значения импульсных характеристик, полученные при использовании стационарного приемника, отображающего происходящие в окружающей среде перемещения, либо усредненные пространственные значения, полученные при использовании приемника, находящегося в движении:

$$P(\tau) = E \left\{ |h(\tau)|^2 \right\}. \quad (1)$$

Мгновенный профиль задержки мощности представляет собой распределение мощности импульсной характеристики. Долговременный профиль задержки мощности получают путем пространственного усреднения кратковременных профилей задержки мощности на одном расстоянии от базовой станции (БС).

Параметры для статистического описания явлений многолучевости. Средняя задержка τ_0 – это взвешенное по мощности среднее значение дополнительной задержки, которое определяется первым моментом профиля задержки мощности (квадрат амплитуды импульсной характеристики):

$$\tau_0 = \frac{\int_0^{\tau_{\max}} \tau P(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau_{\max}} P(\tau) d\tau} = \frac{\sum \tau_n P(\tau_n)}{\sum_n P(\tau_n)}. \quad (2)$$

Среднеквадратичный разброс задержек τ_{rms} определяется как корень квадратный из дисперсии рассеяния мощности:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^{\tau_{max}} (\tau - \tau_0)^2 P(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau_{max}} P(\tau) d\tau}} = \sqrt{\frac{\sum_n \tau_n P(\tau_n)}{\sum_n P(\tau_n)} - \tau_0^2}. \quad (3)$$

Этот параметр является мерой изменчивости средней задержки.

Интервал задержки – это часть импульсной характеристики между двумя значениями дополнительной задержки от момента, когда амплитуда этой характеристики первый раз превышает заданный порог, до момента, когда амплитуда в последний раз падает ниже этого порога.

Количество компонентов многолучевости или сигналов представляет собой число пиковых уровней профиля задержки мощности, амплитуда которых находится в пределах наиболее высокого пикового уровня и превышает значение минимального уровня шума.

Отклонения принимаемого сигнала по времени и по частоте могут быть получены из периодического перемещения по соответствующей полосе частот в коротком интервале времени или из преобразования Фурье мгновенных импульсных характеристик. Полученные изменяющиеся во времени частотные характеристики $H(t, f)$ могут быть использованы для формирования ковариационной функции канала по уравнению:

$$R_H(f, f'; t, t') = E[H(f, t) * H(f', t')]. \quad (4)$$

Степень корреляции выражается нормализованной функцией разности по частоте Δf и разности по времени Δt , заданной уравнением:

$$p(\Delta f, \Delta t) = \frac{R_H(\Delta f, \Delta t)}{\sqrt{M \left\{ |H(f, t)|^2 \right\} M \left\{ |H(f + \Delta f, t + \Delta t)|^2 \right\}}}. \quad (5)$$

На практике важна статистическая связь коэффициентов передачи канала на двух частотах: f и $f + \Delta f$, которая определяется функцией корреляции $R_H(\Delta f)$.

Для каналов с многолучевостью когерентная (корреляционная) полоса пропускания может быть получена из уравнения:

$$R_H(\Delta f) = R_H(\Delta f, \Delta t)|_{\Delta t=0}. \quad (6)$$

Функция корреляции $R_H(\Delta f)$ определяет область частотной когерентности канала связи Δf_H . В пределах полосы когерентности канала Δf_H все частотные компоненты сигнала будут меняться практически одинаково.

Функция корреляции $R_H(\Delta f)$ является непрерывной функцией разности частот Δf и не зависит от частоты f . Эта функция представляет собой преобразование Фурье от профиля рассеяния мощности $P(\tau)$:

$$p(\Delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\tau) * e^{-j*2\pi*\Delta f*\tau} d\tau. \quad (7)$$

Ширина полосы когерентности канала связана со средним временем рассеяния канала: $\Delta f \approx \frac{1}{\tau_{rms}}$. Канал является частотно-селективным, если полоса частотной когерентности Δf_H

меньше или соизмерима с шириной спектра сигнала W , то есть $\Delta f_H < W$. При обратных условиях канал является частотно-неселективным.

Если передатчик или приемник используют несколько антенн, канал описывается набором комплексных коэффициентов передачи и является векторным каналом, который описывается

вектором $h = [h_1 h_2 \dots]$. Пространственная корреляция между коэффициентами h_m и h_n в векторном канале описывается комплексным коэффициентом корреляции $r_{mn} = E[h_m h_n^*]$, где $(\cdot)^*$ - комплексное сопряжение. Корреляция между всеми коэффициентами вычисляется в виде усреднения внешнего произведения вектора канала:

$$R_h = E[hh^H] = E \left\{ \begin{pmatrix} h_1 h_1^* & h_1 h_2^* & \dots & h_1 h_M^* \\ h_2 h_1^* & h_2 h_2^* & \dots & h_2 h_M^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_M h_1^* & h_M h_2^* & \dots & h_M h_M^* \end{pmatrix} \right\}. \quad (8)$$

Матрица R_h называется корреляционной матрицей векторного канала. Она является эрмитовой, т.е. $R_h = R_h^H$.

Система связи ММО имеет N_T антенн на передающей стороне и N_R антенн на приемной стороне (рис. 1). Выходной сигнал в системе связи ММО преобразуется по правилу:

$$y = H * x + n, \quad (9)$$

где $y \in C^{N_R}$ – вектор сигнала на выходе канала связи;

$H \in C^{N_R * N_T}$ – матрица комплексных коэффициентов передачи канала;

$x \in C^{N_T}$ – вектор передаваемых символов;

$n \in C^{N_R}$ – шум в канале связи.

Радиоканал узкополосной системы ММО, состоящей из N_T антенн на передающей стороне и N_R приемных антенн, описывается как линейный канал в комплексном эквивалентном представлении в виде матрицы $H \in C^{N_R * N_T}$, элементы $h_{i,j}$ которой являются коэффициентами передачи от j -й передающей к i -й приемной антенне. Модуль коэффициента передачи $h_{ij} = a_{ij} e^{-j\phi_{i,j}}$ распределен по закону Релея, фаза имеет равномерное распределение в интервале $(0, \pi)$.

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

В общем виде широкополосный канал ММО с многолучевым распространением зависит от времени и описывается системной матрицей преобразования входного сигнала:

$$H(t, \tau) = \begin{pmatrix} h_{11}(t, \tau) & h_{12}(t, \tau) & \dots & h_{1n}(t, \tau) \\ h_{21}(t, \tau) & h_{22}(t, \tau) & \dots & h_{2n}(t, \tau) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{m1}(t, \tau) & h_{m2}(t, \tau) & \dots & h_{N_R N_T}(t, \tau) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

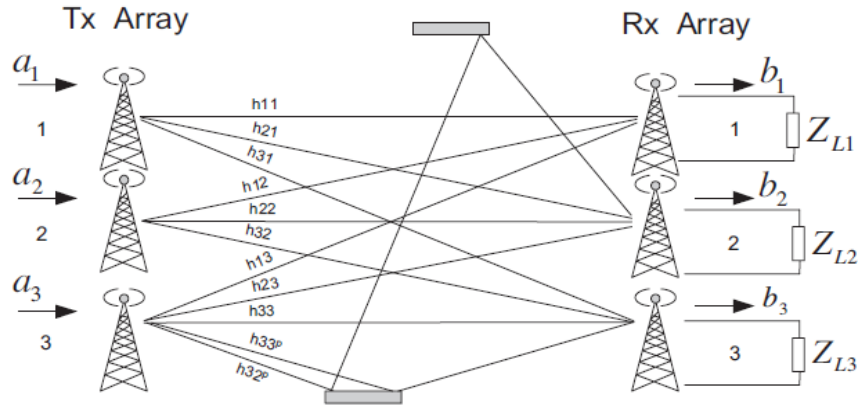


Рис. 1. Коэффициенты передачи MIMO

Каждый из элементов матрицы представляет собой импульсную реакцию от n -й передающей к m -й приемной антенне, зависит от времени и учитывает многолучевой характер распространения:

$$h_{mn}(t, \tau) = \sum_i a_i(t) * \delta(\tau - \tau_i(t)), \quad (11)$$

где a_i – комплексный коэффициент передачи для луча с задержкой τ_i .

Частотная характеристика канала вычисляется на основе импульсной характеристики через преобразование Фурье:

$$H_{mn}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{mn}(t, \tau) * e^{-j*2\pi*f*\tau} d\tau = \sum_i a_i(t) * e^{-j*2\pi*f*\tau_i(t)}. \quad (12)$$

В канале с многолучевым распространением сигнал на выходе канала связи выражается:

$$y(t) = \int_{\tau}^{\tau_{\max}} H(t, \tau) * x(t - \tau) d\tau + n(t). \quad (13)$$

Для канала без частотно-селективных замираний (если полоса частот сигнала меньше полосы когерентности канала связи) нет рассеяния импульсной характеристики, и канал можно записать в виде H . Если канал постоянен во времени, т.е. если интервал когерентности канала больше длительности символа, канал может быть выражен матрицей постоянных коэффициентов H .

Основной метрикой для проверки модели на основе результатов измерений является эргодическая пропускная способность. Хотя этот критерий явно не учитывает пространственную структуру и коррелированность канала, величина пропускной способности является основным параметром для оценки качества системы связи MIMO и именно повышение пропускной способности (спектральной эффективности) является основной целью при разработке алгоритмов обработки сигналов.

По полученным N_{sn} реализациям частотных характеристик канала $H_{nm}(f, t)$ можно оценить удельную пропускную способность $\bar{C}(f, t)$ узкополосной системы связи MIMO при условии равномерного распределения мощности на передающей стороне по всем антеннам:

$$\bar{C} = \frac{1}{N_{sn}} \sum_{sn=1}^{N_{sn}} \left\{ \log_2 \left(\det \left(I_m + \frac{h^2}{N_R} * H(t, f) * H(t, f)^H \right) \right) \right\}, \quad (14)$$

где $I_m \in C^{N_R * N_T}$ – единичная матрица;

h^2 – среднее отношение сигнал/шум на каждой приемной антенне;

$H_{nm}(f, t)$ – нормированная матрица комплексных коэффициентов передачи канала для частоты f ;

$(\cdot)^H$ – операция комплексного сопряжения и транспонирования.

3. Пакет моделирования QUADRIGA

Пакет моделирования QUADRIGA (сокращение от QUAsi Deterministic RadIo channel Gen-erAtor) разработан как система моделирования для MATLAB или Octave в Институте телекоммуникаций им. Фраунгофера, Германия [6, 7]. Пакет предназначен для генерации реалистичных импульсных характеристик радиоканала с целью моделирования сетей мобильной радиосвязи на системном уровне. Моделирование на уровне системы используются для определения производительности новых технологий мобильной связи, чтобы обеспечить объективный индикатор процесса стандартизации в таких организациях, как партнерская программа 3GPP 3-го поколения.

Канал между базовой станцией и абонентом описывается в виде множества многолучевых компонент, объединяемых в кластеры. В QUADRIGA рассеивающие кластеры распределены случайным образом в пространстве около базовой станции и абонента для каждой реализации канала. Параметры крупномасштабных замираний определяют вероятностное распределение параметров канала. Кластер состоит из многолучевых компонент с параметрами углового рассеяния (θ_n, φ_n) по углу передачи и (ϑ_n, ϕ_n) по углу приема.

Моделирование радиоканала в пакете QUADRIGA состоит из двух этапов. На первом этапе генерируются вероятностные параметры крупномасштабных замираний – рассеяние задержек отдельных компонент, их угловое рассеяние, а также производится случайное распределение кластеров отражающих объектов в пространстве. Исходными параметрами программной модели являются: построение сети, траектория движения абонентов, сценарий распространения сигналов, параметры моделирования (центральная частота, полоса частот). В результате моделирования коэффициенты передачи канала и задержки отдельных многолучевых компонент доступны в виде структуры данных. Выражение, по которому вычисляются коэффициенты передачи для кластера n и парой антенн S и U :

$$h_{n,s,u}(t) = \sum_{m=1}^M \sqrt{P_{n,m}} \left\{ C_{n,s,u,m} * e^{j*2\pi*\lambda^{-1}*d_s*\phi_{n,m}} * e^{j*2\pi*\lambda^{-1}*d_u*\phi_{n,m}} \right\}, \quad (15)$$

где $\sqrt{P_{n,m}}$ – мощность многолучевого компонента с номером m в кластере n ;

d_s, d_u – векторы положения антенны базовой станции и абонента;

$\phi_{n,m}$ и $\varphi_{n,m}$ – углы передачи и приема многолучевой компоненты m в кластере n .

4. Результаты исследования

Первоначальная конфигурация сценария выполняется перед генерацией реализаций. Основные параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры модели

Параметры модели	
Тип модели	QUADRIGA v.2.2
Сценарий	3GPP 38.901 UMi NLoS
Количество многолучевых компонент	47
Центральная частота	3.6 ГГц
Полоса	20 МГц
Количество антенн БС	4, 8, 16
Количество абонентов	4

Распределение пользователей в соответствии со сценарием 3GPP-Umi NLOS, соответствующем городской застройке, малому размеру ячейки сети и отсутствию прямой видимости показано на рис. 2:

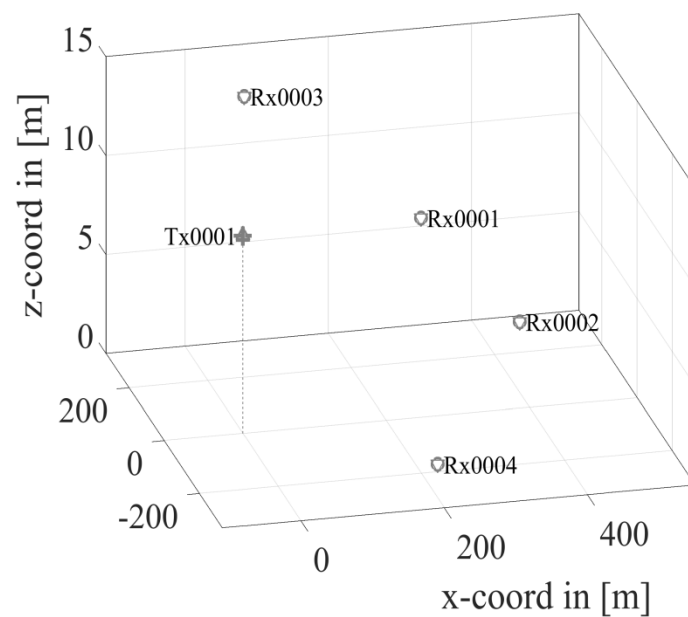


Рис. 2. Распределение абонентов в пространстве

Совокупность 100 импульсных характеристика канала для выборочной пары передающей и приемной антенн h_{nm} показана на рис. 3.

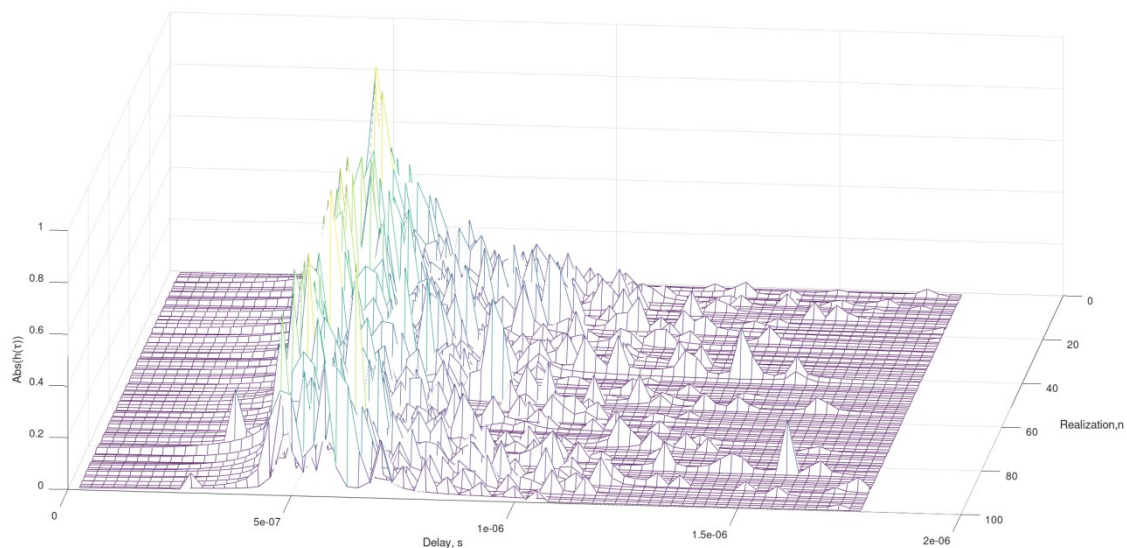


Рис. 3. Совокупность полученных импульсных характеристик

Основными параметрами, описывающими характер многолучевого распространения, являются величина средней задержки и среднеквадратичный разброс задержек. Данные параметры используются для общей характеристики многолучевого рассеяния канала, сравнения с другими каналами при проектировании и анализе систем связи. Полученные при моделировании импульсные характеристики были усреднены по каждому сочетанию антенн по всем измерениям. После этого было определено численное значение средней величины разброса задержек лучей τ_0 и среднеквадратический разброс задержек τ_{rms} вычислялись по выражениям:

$$\tau_0 = \frac{\sum_n \tau_n P(\tau_n)}{\sum_n P(\tau_n)}. \quad (16)$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_n \tau_n^2 * P(\tau_n)}{\sum_n P(\tau_n)} - \tau_0^2}. \quad (17)$$

Для вычислений использовались значения измеренных импульсных характеристик в интервале 20 дБ от максимального значения. По результатам вычислений были получены значения τ_0 = секунд и τ_{rms} = секунд.

Для вероятностного описания коэффициентов передачи матрицы канала H значения импульсной характеристики по соответствующим значениям задержек были сгруппированы в векторы по всем измерениям. При помощи гистограммы определено распределение модуля и фазы комплексных коэффициентов (PDF – плотность распределения вероятностей мгновенных значений), результаты показаны на рис. 4 и 5. Показано распределение модуля коэффициента передачи канала на конкретной поднесущей во всех 100 реализациях.

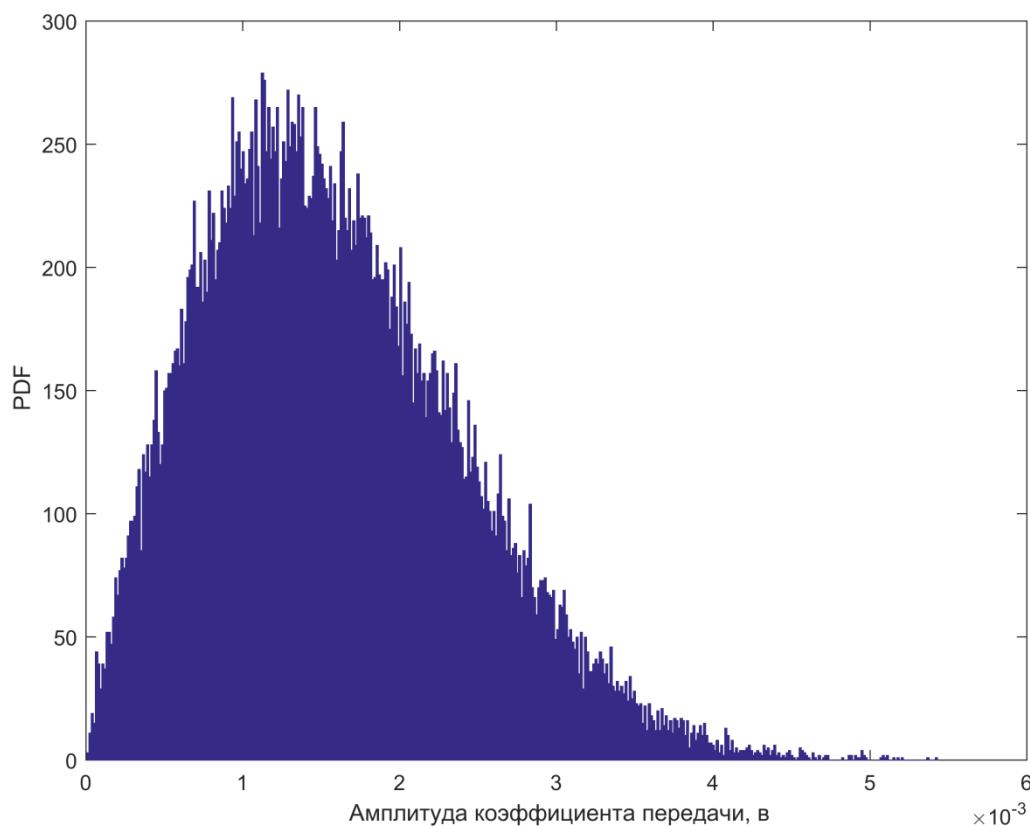


Рис. 4. Распределение модуля коэффициента передачи канала

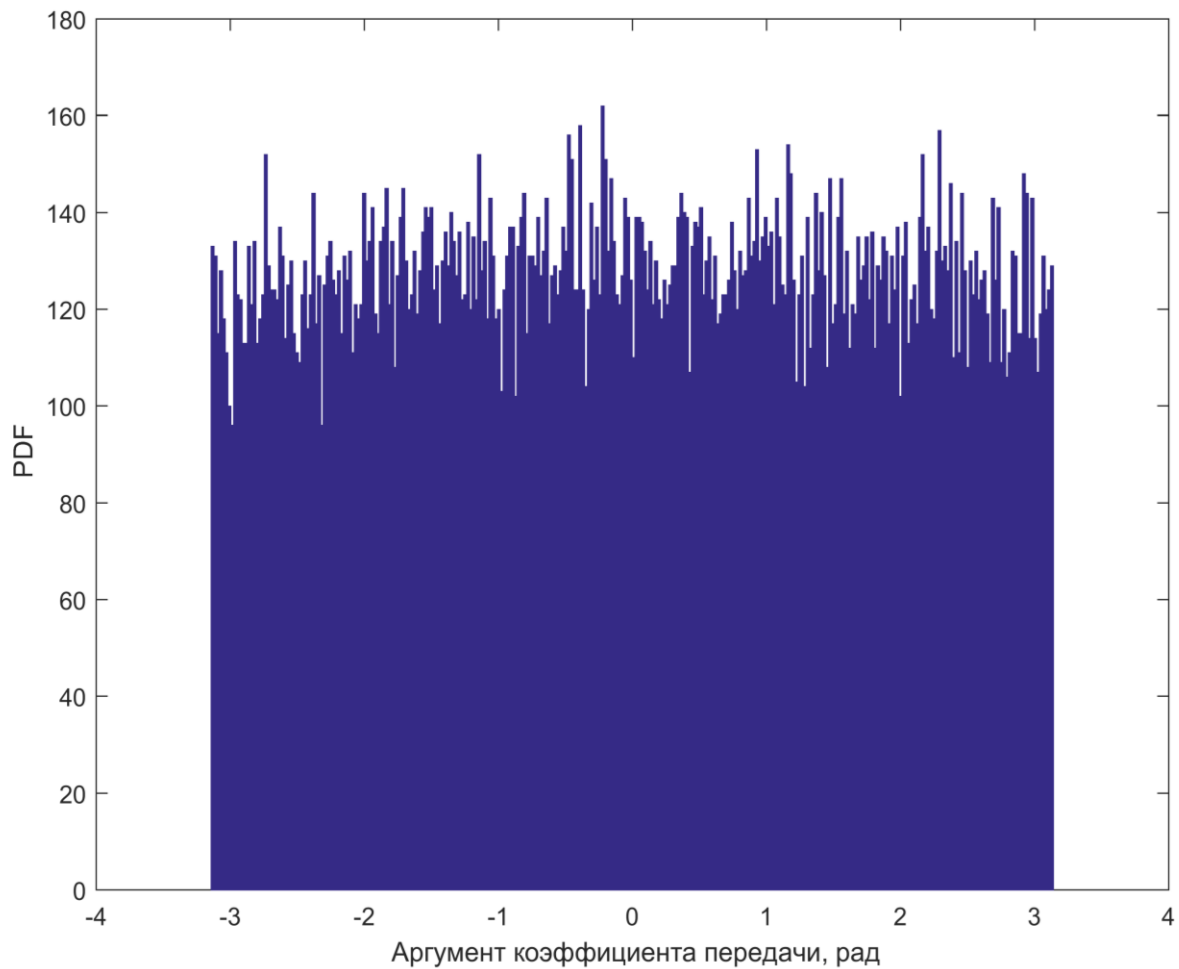


Рис. 5. Распределение фазы коэффициента передачи канала

Модуль коэффициента передачи имеет распределение, близкое к распределению Релея, а значение фазы распределено близко к равномерному распределению.

Реализации матриц коэффициентов передачи канала – случайные величины, вычисляемая пропускная способность – также случайная величина. Для вероятностного описания полученной пропускной способности применяется функция распределения пропускной способности и средняя величина удельной пропускной способности с усреднением по заданному числу реализаций канала.

Полученные матрицы коэффициентов передачи канала были нормированы для исключения влияния затухания канала с изменением расстояния между передатчиком и приемником и возможности вычисления пропускной способности для заданного отношения сигнал/шум.

Для отношения сигнал/шум на каждой приемной антенне, равного 10 дБ, были получены графики функции распределения удельной пропускной способности полученного канала при конфигурации 4x4 (рис. 6).

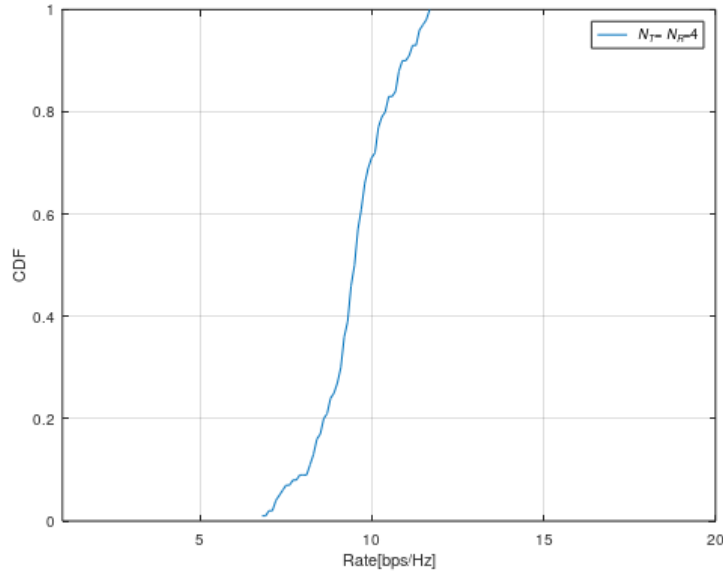


Рис. 6. Функция распределения удельной пропускной способности канала с конфигурацией 4x4

Исследование пространственной корреляции коэффициентов передачи канала проводилось с использованием как узкополосных, так и широкополосных представлений импульсной характеристики канала. Первоначально доступные данные измерений канала использовались для извлечения эквивалентного описания узкополосного канала h_{nb} путем усреднения изменяющейся в пространстве-времени импульсной характеристики $h_{nb}(t, s)$ по t . В операции усреднения выражения (18) учитывались только многолучевые компоненты с уровнем менее 6 дБ от максимального значения. Составляющие меньшего уровня не учитываются, так как их вклад в общую импульсную характеристику незначителен.

$$h_{nb}(t, s) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L h_{nb}(t, \tau_l, s). \quad (18)$$

Изменив значения выборки $h_{nb}(t)$ в матричном формате, был сформирован набор узкополосных матричных реализаций канала ММО $h_{nb}(t)$. Для каждой возможной пары антенных элементов с заданным значением расстояния, например, для приемной антенны решетки с расстоянием между соседними элементами Δx пространственная корреляция вычислялась с использованием выражения:

$$p_{c,ij}(\Delta) = \frac{E_t \left[\left(h_{i,j}^{nb} - E_t [h_{i,j}^{nb}] \right) * \left(h_{i+\frac{\Delta}{rxspac}, j}^{nb} - E_t [h_{i+\frac{\Delta}{rxspac}, j}^{nb}] \right)^H \right]}{\sqrt{E_t \left[\left| h_{i,j}^{nb} - E_t [h_{i,j}^{nb}] \right|^2 \right] * E_t \left[\left| h_{i+\frac{\Delta}{rxspac}, j}^{nb} - E_t [h_{i+\frac{\Delta}{rxspac}, j}^{nb}] \right|^2 \right]}} \quad (19)$$

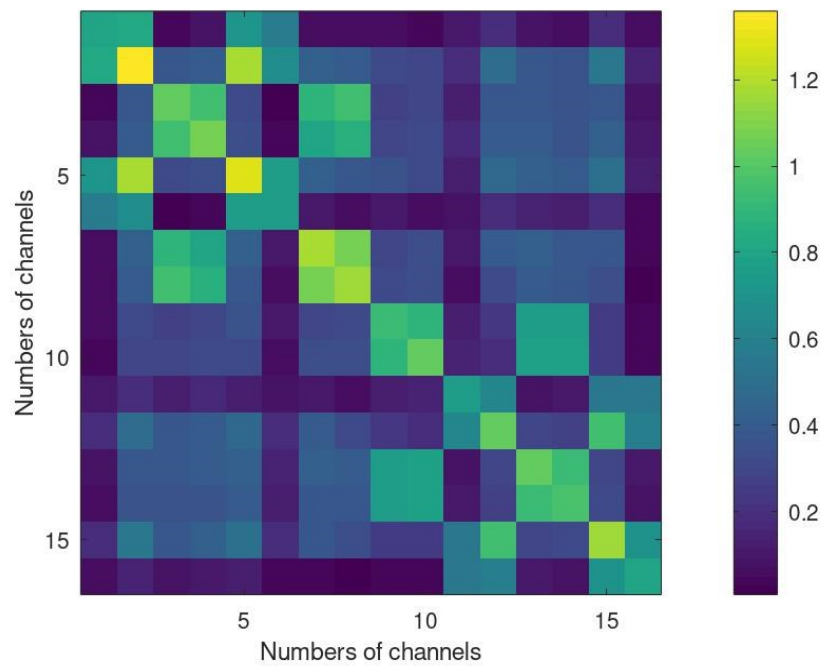


Рис. 7. Пространственная корреляция для антенн с конфигурацией канала 4x4

Из рис. 7 можно сделать вывод, что приемные и передающие антенны слабо коррелированы между собой. Связано это с тем, что число антенн в нашем случае небольшое (4 передающих и 4 приемных антенны). К тому же, у нас отсутствует прямая видимость между пользователем и базовой станцией. Определенные антенны обладают большей взаимной корреляцией, цветовая шкала отображает численное значение корреляции.

Далее рассмотрим результаты другой конфигурации канала – 8x8. Для отношения сигнал/шум на каждой приемной антенне, равного 10 дБ, были получены графики функции распределения удельной пропускной способности (спектральной эффективности) полученного канала при конфигурации 8x8 (рис. 8).

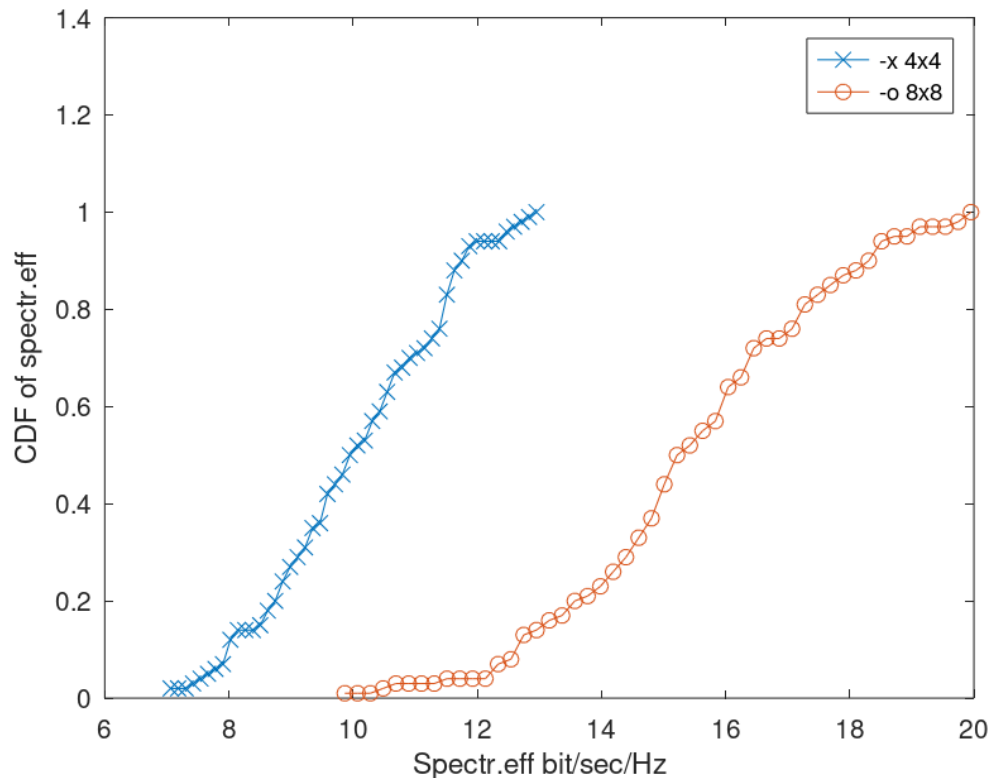


Рис. 8. Функция распределения спектральной эффективности канала с конфигурацией 4x4 и 8x8

Из рис. 8 видно, что по мере увеличения количества приемных и передающих антенн пропускная способность канала увеличивалась. Из рис. 9 видно, что пространственная корреляция для антенн с конфигурацией 8x8 намного выше, чем для конфигурации 4x4. Светлые области соответствуют высокой корреляции между коэффициентами матрицы канала. Более темные области соответствуют сигналам с меньшей пространственной корреляцией. Полученная полная корреляционная матрица канала дает возможность оценить параметры канала, допустимую пропускную способность и проверить возможность реализации в данном канале пространственного мультиплексирования.

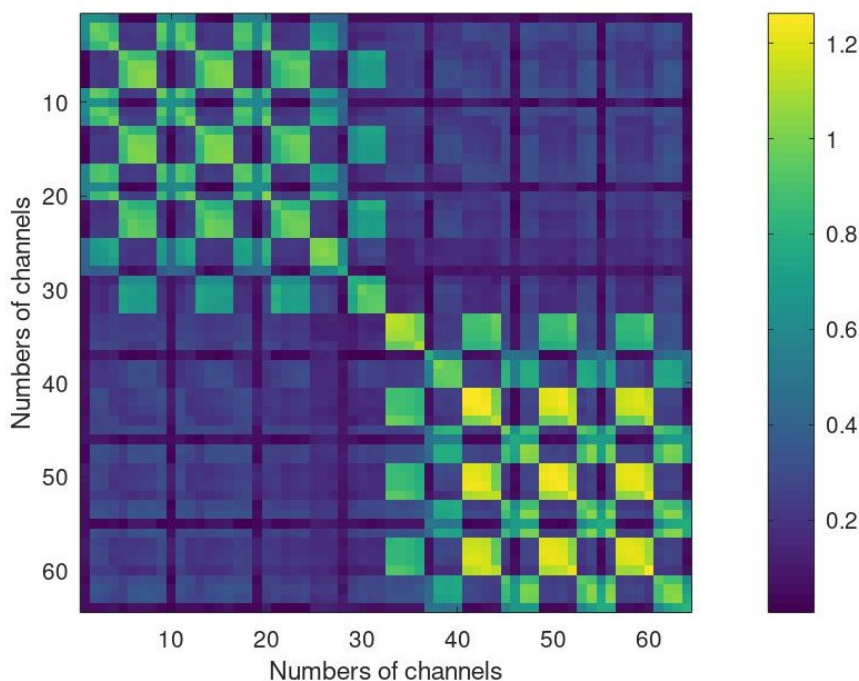


Рис. 9. Пространственная корреляция для антенн с конфигурацией канала 8x8

5. Заключение

В работе описан численный эксперимент, в котором были получены реализации канала ММО с параметрами распространения в условиях городской застройки для малого размера ячейки связи. Выбраны две конфигурации: 4x4 и 8x8. Для каждого вида конфигурации были найдены основные параметры радиоканала, что позволило сравнить эффективность использования той или иной конфигурации.

1. При увеличении количества антенн на передающей и приёмной стороне с конфигурации $N_T \times N_R = 4 \times 4$ до $N_T \times N_R = 8 \times 8$ в канале ММО происходит увеличение удельной пропускной способности.

2. Выполнена оценка полной корреляционной матрицы канала, результаты показаны в виде диаграммы распределения значений коэффициентов корреляции между всеми антеннами.

Полученные реализации канала позволяют исследовать различные алгоритмы обработки сигналов в системах ММО.

Литература

1. Almers P., Bonek E., Burr A. et al. Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2007.

2. *Kermoal J. P., Schumacher L., Pedersen K. I., Mogensen P. E., and Frederiksen F.* A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. August 2002. V. 20, № 6.
3. *Yu K., Bengtsson M., Ottersten B., McNamara D. P., Karlsson P., and Beach M.* Modeling of wide-band MIMO radio channels based on NLoS indoor measurements // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. May 2004. V. 33, № 3. P. 655–665.
4. *Skentos N., Kanatas A. G., Pantos G., and Constantinou P.* Capacity results from short range fixed MIMO measurements at 5.2 GHz in urban environment // *Proc. of IEEE International Conf. on Communications*, 20–24 June 2004. V. 5. P. 3020–3024.
5. *Bengtsson E. L., Rusek F., Malkowsky S., Tufvesson F., Karlsson P. C. and Edfors O.* A simulation framework for multiple-antenna terminals in 5G massive MIMO systems // *IEEE Access*. 2017. V. 5. P. 26819–26831.
6. *Jaeckel S., Raschkowski L., Boerner K. and Thiele L.* QuaDRiGa: A 3-D multicell channel model with time evolution for enabling virtual field trials // *IEEE Trans. on Ant. & Prop.* 2014.
7. *Jaeckel S., Raschkowski L., Borner K., Thiele L. et al.* QuaDRiGa-Quasi deterministic radio channel generator: user manual and documentation. Fraunhofer Heinrich Hertz institute, Tech. Rep. v2.0.0, Aug. 2017.

*Статья поступила в редакцию 02.10.2021;
переработанный вариант – 17.11.2021.*

Калачиков Александр Александрович

к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), email: 330rts@gmail.com.

Безгодкин Р. О.

студент группы РТ-84 института телекоммуникаций СибГУТИ.

Петров И.А.

студент группы РТ-84 института телекоммуникаций СибГУТИ.

Винников А.А.

студент группы РТ-84 института телекоммуникаций СибГУТИ.

Performance evaluation of MIMO channel model using the open-source model implementation

A. Kalachikov, R. Bezgodkin, I. Petrov, A. Vinnikov

In this paper the wireless MIMO channel modeling using the open-source model implementation QUADGIGA is considered. The obtained impulse responses are presented and used for channel parameters estimation. The validation of the MIMO channel modeling was evaluated by calculating the correlation matrix and CDF of channel capacity in different configurations. Statistical distribution of magnitude and the elements phase of the MIMO channel matrix are evaluated numerically by histogram.

Keywords: wireless MIMO channel model, channel parameter estimation, full channel correlation matrices, MIMO channel capacity.