

ПОСТРОЕНИЕ И ПРОВЕРКА МОДЕЛЕЙ РАДИОКАНАЛА MIMO НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассматривается задача построения и проверки моделей радиоканала MIMO на основе результатов экспериментальных измерений радиоканала. Целью работы является экспериментальный анализ двух аналитических корреляционных моделей радиоканалов MIMO с определением параметров моделей из данных, полученных в результате экспериментального измерения импульсных характеристик радиоканала MIMO в диапазоне 2,3 ГГц. Приводятся описание моделей Кронекера и Вайхсельбергера, описание процедуры зондирования радиоканала и полученные импульсные характеристики. На основе данных измерений вычисляются оценки полной корреляционной матрицы канала, раздельные корреляционные матрицы для построения моделей измеренных радиоканалов. Приводятся критерии качества моделирования и результаты моделирования радиоканала для различных конфигураций антенн на передающей и приемной сторонах.

Ключевые слова: радиоканал MIMO, экспериментальное измерение радиоканала MIMO, пропускная способность, пространственная структура радиоканала, пространственная корреляция, аналитические модели радиоканалов MIMO.

Введение. Использование нескольких антенн на передающей и приемной стороне привело к появлению систем связи MIMO, в которых возможно значительное увеличение спектральной эффективности при передаче данных по радиоканалу [1].

Свойства канала определяются условиями распространения сигналов, пространственной корреляцией, которая зависит от конфигурации антенн, их взаимного расположения, распределения отражающих объектов между парами передающих и приемных антенн.

Для анализа и разработки систем связи MIMO, исследования алгоритмов обработки сигналов требуются модели каналов, точно отображающие пространственные свойства реальных каналов. Параметры моделей каналов определяются из экспериментальных измерений реальных каналов связи MIMO [2]. В работе рассматривается решение задачи имитационного моделирования канала MIMO с проверкой точности аналитических корреляционных моделей узкополосного канала MIMO на основе результатов измерения радиоканала.

Теоретическая часть. Узкополосная система связи MIMO, состоящая из M_T передающих антенн и M_R приемных антенн с частотно-неселективными замираниями описывается выражением

$$y = Hx + n, \quad (1)$$

где H — матрица канала размером $M_R \times M_T$, состоящая из комплексных коэффициентов передачи между антеннами системы, x — вектор передаваемых символов размером M_T , n — вектор отсчетов

шума с нормальным распределением размером M_R . Описание узкополосной системы может быть расширено на модель широкополосного многолучевого канала с независимыми задержками [1–2].

При отсутствии информации на приемной стороне о состоянии канала на передающей стороне оптимальным является равномерное размещение мощности передатчика по каждой из антенн передающей антенной решетки и передача каждой отдельной антенной соответствующего потока символов. В таком случае пропускная способность канала выражается как

$$C = E \left\{ \log_2 \det \left(I + \frac{\rho}{M_T} HH^H \right) \right\}, \quad (2)$$

где $E(\cdot)$ — операция усреднения; ρ — величина отношения сигнал/шум; $(\cdot)^H$ — операция эрмитового сопряжения матрицы.

Пропускная способность максимальна при условии ортогональности столбцов матрицы H . Наличие коррелированности между антенными элементами на передающей и приемной стороне приводит к снижению пропускной способности канала.

При исследовании и разработке различных вариантов формирования и приема сигналов, аналитические модели каналов на основе пространственной корреляции описывают матрицу канала MIMO статистически в терминах корреляции между элементами матрицы канала. Пространственная корреляция между элементами матрицы канала на передающей и приемной стороне оказывает влияние

на пропускную способность канала ММО и общие характеристики системы связи. Поэтому важным является отображение пространственной корреляции между антенными элементами в моделях канала ММО [2].

Корреляционные свойства канала ММО между всеми парами антенны системы определяются в виде полной корреляционной матрицы канала R_H размером $M_T M_R \times M_T M_R$, которая выражается как

$$R_H = E\{\text{vec}(H)\text{vec}(H)^H\}, \quad (3)$$

где $\text{vec}(H)$ означает вектор-столбец размером $M_T M_R \times 1$, состоящий из всех столбцов матрицы H , составленных один на другой.

Обобщенная аналитическая модель канала ММО на основе полной корреляционной матрицы определяется как

$$\text{vec}(H) = R_H^{-\frac{1}{2}} H_w, \quad (4)$$

где H_w — матрица размером $M_T \times M_R$, состоящая из некоррелированных случайных чисел. При описании релейского радиоканала ММО матрица H_w состоит из комплексных элементов с нормальным распределением реальной и мнимой частей. Модель точно воспроизводит свойства канала, но размеры полной матрицы приводят к большой вычислительной сложности при практическом использовании модели. Для преодоления этого недостатка используется декомпозиция полной корреляционной матрицы на односторонние матрицы корреляций на приемной и передающей стороне. Примером таких моделей являются модели Кронекера и Вайхсельбергера, свойства которых изучаются в данной работе.

Модель Кронекера используется для описания узкополосных каналов и предполагает раздельное описание пространственной корреляции на передающей и приемной сторонах. При этом число параметров модели снижается, и модель может использоваться при аналитическом исследовании системы. Корреляционная матрица на приемной стороне вычисляется в виде

$$R_{RX} = E\{HH^H\}, \quad (5)$$

на передающей стороне в виде

$$R_{TX} = E\{H^T H^*\}. \quad (6)$$

В данной модели аппроксимация полной корреляционной матрицы канала R_H выражается как произведение Кронекера матриц корреляции на передающей и приемной сторонах

$$R_H = R_{TX} \otimes R_{RX}. \quad (7)$$

В данной модели матрицы корреляции на приемной и передающей сторонах считаются независимыми, что соответствует случаю удаленного размещения антенных решеток на передающей и приемной стороне и наличию большого числа случайных переотражателей между решетками. Получение реализаций канала выполняется в соответствии с моделью в виде

$$H_{Kron} = R_{TX}^{-1/2} H_w R_{RX}^{-1/2}, \quad (8)$$

где $R_{TX}^{-1/2}$ и $R_{RX}^{-1/2}$ — квадратный корень из корреляционных матриц на передающей и приемной стороне, H_w — матрица из элементов с комплексным гауссовым распределением.

Количество параметров, описывающих модель Кронекера, составляет $M_T^2 + M_R^2$ реальных чисел.

Для построения более точной аналитической модели канала с учетом взаимосвязи между пространственной корреляцией на передающей и приемной сторонах предложена модель Вайхсельбергера [3]. Данная модель канала является аналитической корреляционной моделью, позволяющая получить реализации канала со статистическими свойствами измеренных данных. Модель также использует односторонние корреляционные матрицы в качестве параметров, но строится с учетом совместной пространственной структуры, в отличие от модели Кронекера.

Предположение о независимости между параметрами многолучевых компонент на передающей и приемной сторонах во многих случаях приводит к потере части пространственной структуры канала связи. Модель Вайхсельбергера учитывает эту связь при помощи матрицы связности Ω , которая позволяет отобразить совместную пространственную корреляцию на передающей и приемной стороне. Модель использует декомпозицию по собственным числам корреляционных матриц на передающей и приемной сторонах

$$\begin{aligned} R_{RX} &= U_{RX} \Lambda_{RX} U_{RX}^H, \\ R_{TX} &= U_{TX} \Lambda_{TX} U_{TX}^H, \end{aligned} \quad (9)$$

где U_{RX} и U_{TX} — комплексные унитарные матрицы, состоящие из собственных векторов односторонних корреляционных матриц, Λ_{TX} и Λ_{RX} — диагональные матрицы, содержащие собственные числа односторонних корреляционных матриц на приемной и передающей стороне.

Модель Вайхсельбергера позволяет получить реализации матриц канала ММО в виде

$$H_{Weich} = U_{RX} (\tilde{\Omega} \cdot H_w) U_{TX}^T. \quad (10)$$

Параметры модели Вайхсельбергера вычисляются на основе односторонних корреляционных матриц, структура матрицы связи отражает пространственную структуру канала. Необходимость вычисления матрицы связи приводит к тому, что модель является более сложной по сравнению с моделью Кронекера, но при этом позволяет более точно выполнить моделирование канала ММО на основе данных измерения канала. Количество параметров, описывающих модель, составляет $M_T(M_R - 1) + M_R(M_T - 1) + M_T M_R$ реальных чисел [3].

Для исследования свойств моделей проводятся измерения радиоканалов ММО, результаты которых используются как исходные данные для построения, проверки и сравнения моделей.

Экспериментальные исследования. Для проверки возможности аппроксимации полной корреляционной матрицы канала произведением Кронекера, построения моделей Кронекера и Вайхсельбергера были использованы данные результатов измерений. Для построения модели узкополосных каналов связи использовался узкий частотный диапазон из общего диапазона измерений.

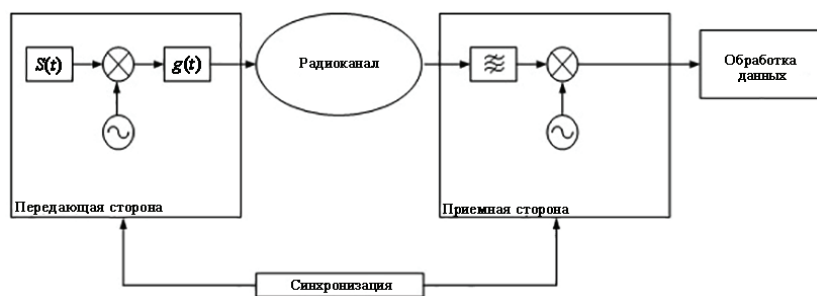


Рис. 1. Схема зондирования радиоканала

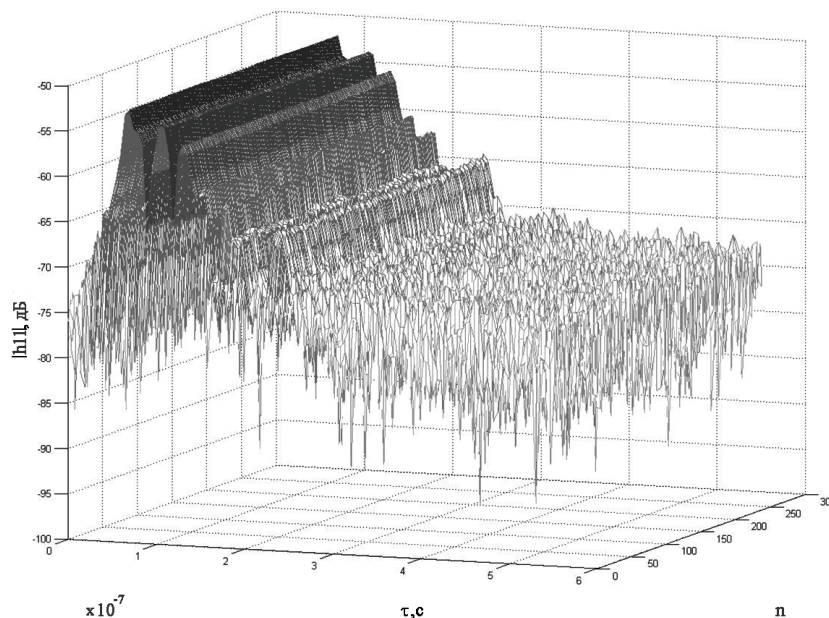


Рис. 2. Измеренные импульсные характеристики

Измерения импульсных характеристик канала MIMO выполнялись по корреляционному принципу. Измерения проводились в лабораторных условиях внутри помещения. Общая схема системы для зондирования радиоканала MIMO представлена на рис. 1. При измерении импульсных характеристик канала по корреляционному принципу на передающей стороне формируется тестовый псевдослучайный сигнал с хорошими корреляционными свойствами. Для получения комплексной импульсной характеристики радиоканала вычисляется свертка квадратурных отсчетов принятого сигнала с образцом зондирующего сигнала. Точность измерения импульсной характеристики зависит от корреляционных свойств зондирующего сигнала, периода его повторения, равномерности спектра зондирующего сигнала, в пределах полосы частот измеряемого радиоканала, ширины спектра зондирующего сигнала.

Центральная частота излучаемого радиосигнала — 2,3 ГГц, ширина полосы частот тестового сигнала 100 МГц. В качестве тестовой псевдослучайной последовательности выбрана последовательность Касами длительностью 16383 отсчета [4]. Тестовая последовательность предварительно фильтровалась цифровым ФНЧ с характеристикой типа приподнятый косинус и частотой среза 50 МГц для получения спектра с меньшими внеполосными составляющими. Далее тестовая последовательность использовалась в векторном генераторе сигналов Rohde&Schwarz SMBV100A для формирования зон-

дирующего радиосигнала с равномерным спектром. На приемной стороне сигнал обрабатывался анализатором сигналов FSW26 Rohde&Schwarz, полученные квадратурные отсчеты принятых сигналов записываются в массиве памяти.

Были выполнены измерения канала MIMO в конфигурации 4 передающие и 4 приемные антенны. При измерениях антенны линейно передвигались с шагом λ и $\frac{\lambda}{2}$, где λ — длина волны, см.

Тестовый сигнал непосредственно подавался на вход приемника, записывается в виде квадратурных отсчетов и является эталонным при вычислении импульсных характеристик канала.

Полученное множество реализаций принятого сигнала далее обрабатывалось на ПК, посылки тестовых сигналов выравнивались по начальным отсчетам для дальнейшей обработки. Для каждой комбинации антенн было получено 300 реализаций импульсных характеристик, которые показаны на рис. 2 для выбранной пары передающих и приемных антенн.

Среднее время рассеяния (задержки) канала $\bar{\tau}$ и среднеквадратичный разброс задержки τ_{rms} являются важными параметрами канала и используются для общей характеристики многолучевого рассеяния канала, сравнения с другими каналами при проектировании и анализе систем связи.

Измеренные импульсные характеристики были усреднены по каждому сочетанию антенн по всем измерениям. После этого было определено числен-

ное значение средней величины разброса задержек лучей $\bar{\tau}$ и среднеквадратический разброс задержек τ_{rms} .

Для вычислений использовались значения измеренных импульсных характеристик в интервале 20 дБ от максимального значения.

По реализациям импульсных характеристик был вычислен профиль рассеяния мощности канала и определены его числовые значения: $\bar{\tau} = 6,2 \cdot 10^{-8}$ с и $\tau_{rms} = 1,9 \cdot 10^{-8}$ с.

Модуль коэффициентов передачи имеет распределение, близкое к распределению Релея, а значение фазы распределено близко к равномерному распределению. Это соответствует условиям распространения с отсутствием прямой видимости. Для анализа характеристик измеренного канала связи выполняют нормализацию матриц канала.

По полученным реализациям импульсных характеристик канала определены параметры моделей. Для модели Кронекера это корреляционные матрицы на передающей и приемной сторонах, для модели Вайхсельбергера — матрицы собственных векторов на передающей и приемной сторонах, по которым вычислена матрица связности $\tilde{\Omega}$.

Оценка полной корреляционной матрицы, раздельные корреляционные матрицы на передающей и приемной сторонах были вычислены по множеству из 300 измеренных матриц канала H_m по выражениям:

$$\hat{R}_H = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{vec}(H_{mn}) \text{vec}(H_{mn})^H, \quad (11)$$

$$\hat{R}_r = \frac{1}{NM_R} \sum_{n=1}^N (H_{mn}^H H_{mn})^T, \quad (12)$$

$$\hat{R}_t = \frac{1}{NM_T} \sum_{n=1}^N H_{mn} H_{mn}^H. \quad (13)$$

Для модели Вайхсельбергера матрицы связности были вычислены в виде

$$\tilde{\Omega} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (U_{RX}^H H_n U_{TX}^*) \cdot (U_{RX}^T H_n U_{TX}). \quad (14)$$

На основе вычисленных параметров моделей из результатов измерений выполнено получение реализаций матриц каналов по выражениям (8) и (10) методом имитационного моделирования Монте-Карло. Для построения и проверки характеристик модели каналов необходимо определить критерий точности моделирования.

Наиболее широко в качестве критерия используется пропускная способность канала как самый важный показатель системы связи [5–7].

Хотя величина пропускной способности канала не отображает особенности пространственной структуры канала, она используется как показатель спектральной эффективности системы.

Эргодическая пропускная способность канала вычисляется усреднением по множеству величин мгновенной пропускной способности канала, определенным по соответствующим реализациям матриц канала узкополосной системы ММО

$$\hat{C} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ \log_2 \left[\det \left(I + \frac{\rho}{M_T} H_n H_n^H \right) \right] \right\}. \quad (15)$$

Аналитические корреляционные модели должны точно аппроксимировать полную корреляционную

Таблица 1

Ошибка аппроксимации полной корреляционной матрицы

Модель	Конфигурации антенн	
	2×2	4×4
Кронекера	0,032	0,075
Вайхсельбергера	0,018	0,02

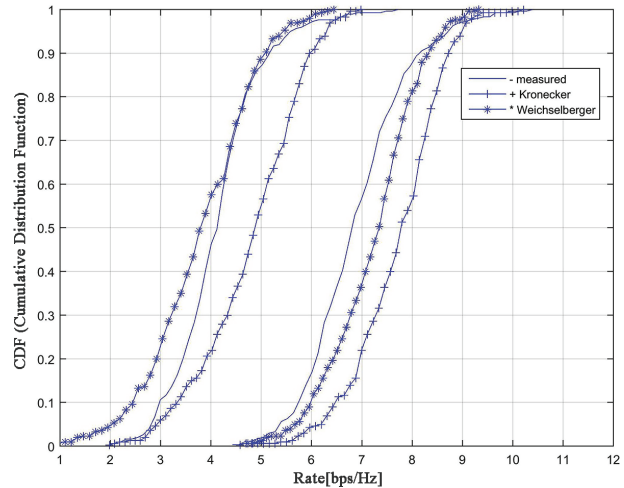


Рис. 3. Функция распределения величины удельной пропускной способности измеренного канала и моделей каналов

матрицу канала, отображающую пространственную структуру канала. Поэтому критерием качества модели является минимальная ошибка аппроксимации полной корреляционной матрицы \hat{R}_H , вычисленной на основе измеренных импульсных характеристик и синтезированной R_{mod} по реализациям модели.

Ошибка аппроксимации вычисляется как

$$\psi(\hat{R}_H, R_{mod}) = \frac{\|\hat{R}_H - R_{mod}\|_F}{\|R_{mod}\|_F}, \quad (16)$$

где $\|\cdot\|_F$ — норма Фробениуса [8–9].

Вычисленная по выражению (16) ошибка аппроксимации полной корреляционной матрицы для различных конфигураций антенн в табл. 1.

Модель Кронекера обладает большей ошибкой аппроксимации при увеличении количества антенн. Это можно объяснить тем, что для систем с большим количеством антенн и большим угловым разрешением отдельных лучей ошибка аппроксимации через произведение Кронекера увеличивается, т.к. угловые спектры на передающей и приемной стороне уже не являются независимыми. Модель Вайхсельбергера учитывает зависимость пространственной корреляции на приемной и передающей сторонах и обеспечивает меньшую ошибку аппроксимации.

Также по выражению (15) была вычислена оценка пропускной способности каналов двух типов моделей. На рис. 3 показана функция распределения (CDF — Cumulative distribution function) эргодической удельной пропускной способности кана-

ла MIMO для двух типов конфигурации антенн. В левой части графика показано распределение пропускной способности измеренного канала и двух моделей для $M_T = M_R = 2$. В правой части показано распределение пропускной способности измеренного канала и двух моделей для $M_T = M_R = 4$.

Модель Вайхсельбергера позволяет более точно аппроксимировать полную корреляционную матрицу и получить реализации канала с меньшим отклонением от измеренной пропускной способности, чем модель Кронекера. Это является подтверждением необходимости учета пространственной корреляции между передающей и приемной сторонами при аналитическом моделировании каналов связи MIMO.

Заключение. Полученные в результате экспериментальных измерений реализации импульсных характеристик каналов используются для статистического анализа параметров канала.

Построенные модели канала MIMO достаточно точно отображают свойства измеренного канала и могут использоваться при разработке и анализе различных алгоритмов обработки сигналов в системах связи MIMO.

Библиографический список

1. Foschini G. J., Gans M. J. On limits of Wireless communications in a fading environment when using multiple antennas // *Wireless Personal Communications*. March 1998. Vol. 6, no. 3. P. 311–315. DOI: 10.1023/A:1008889222784.
2. Costa N., Haykin S. Multiple-input multiple-output channel models: theory and practice // *IEEE*. John Wiley. 2010. 225 p. ISBN-10: 047039983X, ISBN-13: 978-0470399835.
3. Weichselberger W., Herdin M., Ozelik H [et al.]. A stochastic MIMO channel model with joint correlation of both link ends // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2006. Vol. 5, no. 1. P. 90–99. DOI: 10.1109/TWC.2006.1576533.
4. Sarwate D. V., Pursley M. B. Crosscorrelation Properties of Pseudorandom and Related Sequences // *Proceedings of the IEEE*. 1980. Vol. 68, no. 5. P. 583–619. DOI: 10.1109/PROC.1980.11697.

5. Skentos N., Kanatas A. G., Pantos G. [et al.]. 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. 2004. Vol. 5. P. 3020–3024.

6. Kolmonen V. M., Kivinen J., Vuokko L. [et al.]. 5,3-GHz MIMO radio channel sounder // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2006. Vol. 55, no. 4. P. 1263–1269.

7. Jose-Maria Molina-Garcia-Pardo, Jose-Victor Rodriguez, Leonardo Juan-Llacer. MIMO channel sounder based on two network analyzers // *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 2008. Vol. 57, no. 9. P. 2052–2058. DOI: 10.1109/TIM.2008.922091.

8. Andreas F. Molisch. A generic model for MIMO wireless propagation channels in macro- and microcells // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2004. Vol. 52, no. 1. P. 61–71.

9. Yu K., Bengtsson M., Ottersten B. [et al.]. Modeling of wide-band MIMO radio channels based on NLoS indoor measurements // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2004, Vol. 53, no. 3. P. 655–665. DOI: 10.1109/TVT.2004.827164.

КАЛАЧИКОВ Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства».

Адрес для переписки: diff32@rambler.ru

ЩЕЛКУНОВ Николай Сергеевич, аспирант кафедры «Радиотехнические системы».

Адрес для переписки: shns@ngs.ru

Для цитирования

Калачиков А. А., Щелкунов Н. С. Построение и проверка моделей радиоканала MIMO на основе результатов измерений // *Омский научный вестник*. 2018. № 2 (158). С. 93–97. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-93-97.

Статья поступила в редакцию 05.02.2018 г.

© А. А. Калачиков, Н. С. Щелкунов