

УДК 621.396.9

ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАДИОКАНАЛА ММО НА ОСНОВЕ АППРОКСИМАЦИИ ПОЛНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МАТРИЦЫ

А.А. Калачиков, Н.С. Щелкунов

*ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет телекоммуникаций
и информатики, Новосибирск, Россия*

Рассмотрена задача построения и проверки аналитической модели радиоканала ММО на основе аппроксимации полной корреляционной матрицы канала. Проверка точности модели выполнена с использованием результатов экспериментальных измерений радиоканала. Исследована аналитическая корреляционная модель радиоканалов ММО с определением параметров модели из данных, полученных в результате экспериментального измерения импульсных характеристик радиоканала ММО с центральной частотой 2.3 ГГц и полосой 100 МГц. Приводится описание реализованных моделей Кронекера и Вайхсельбергера, модели с использованием аппроксимации полной корреляционной матрицы канала суммой произведений Кронекера по алгоритму Ван Лоана и Питсаниса. Из измеренных величин вычисляются оценки полной корреляционной матрицы канала, отдельные корреляционные матрицы для построения моделей измеренных радиоканалов, вычисляется аппроксимация полной корреляционной матрицы канала. Приведены критерии качества моделирования и результаты моделирования радиоканала для различных конфигураций антенн на передающей и приемной стороне.

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

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-52-61

Введение

Свойства радиоканала и параметры системы связи определяются условиями распространения сигналов, особенно наличием пространственной корреляции, которая зависит от конфигурации антенн, их взаимного расположения, распределения отражающих объектов между парами передающих и приемных антенн.

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

Для анализа, разработки систем связи ММО и исследования алгоритмов обработки сигналов требуются модели каналов, точно отображающие свойства реальных каналов. Параметры моделей каналов определяются из экспериментальных измерений реальных каналов связи ММО [2].

Одним из возможных методов измерения импульсных характеристик радиоканала ММО является корреляционный метод с использованием зондирующих сигналов. Результаты измерений используются для последующей обработки и оценки параметров радиоканала ММО с многолучевым распространением сигналов.

При исследовании и разработке различных вариантов формирования и приема сигналов аналитические модели каналов на основе пространственной корреляции описывают матрицу канала ММО 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].

Данное требование отображено в используемых аналитических моделях канала на основе заданной полной корреляционной матрицы канала. Примером таких моделей являются модели Кронекера и Вайхсельбергера. Модель Кронекера используется для описания узкополосных каналов и предполагает раздельное описание пространственной корреляции на передающей и приемной стороне. При этом число параметров модели снижается и модель может использоваться при аналитическом исследовании системы.

Для построения более точной аналитической модели канала с учетом взаимосвязи между пространственной корреляцией на передающей и приемной стороне предложена модель Вайхсельбергера [2, 3]. Данная модель является аналитической корреляционной моделью, позволяющей 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.

Целью работы является исследование аналитических корреляционных моделей радиоканалов ММО на основе данных, полученных в результате экспериментального измерения импульсных характеристик радиоканала ММО в диапазоне 2.3 ГГц. Также решается задача построения аналитической модели на основе аппроксимации полной корреляционной матрицы канала по алгоритму Ван Лоана и Питсаниса. Для подтверждения точности моделирования определяются критерии качества моделирования при различных конфигурациях антенн на передающей и приемной стороне.

1. Методы построения аналитических моделей канала ММО

Узкополосная система связи ММО, состоящая из M_T передающих и M_R приемных антенн с частотно неселективными рэлеевскими замираниями описывается выражением

$$y = Hx + n,$$

где H – матрица канала размером $M_T \times M_R$, 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 о состоянии канала на приемной стороне оптимальным является равномерное размещение мощности передатчика по каждой из M_T антенн передающей антенной решетки и передача каждой отдельной антенной соответствующего потока символов. В таком случае эргодическая пропускная способность канала выражается как

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

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.

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

$$R_H = E \left\{ \text{vec}(H) \text{vec}(H)^H \right\},$$

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

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

где H_w – матрица размером $M_T \times M_R$, состоящая из некоррелированных случайных чисел. При описании рэлеевского радиоканала ММО матрица H_w состоит из комплексных элементов с нормальным распределением реальной и мнимой части. Модель точно воспроизводит свойства канала, но размеры полной корреляционной матрицы приводят к большой вычислительной сложности при практическом использовании модели. Для преодоления этого недостатка используется представление полной корреляционной матрицы канала произведением Кронекера двух корреляционных матриц на приемной и передающей стороне меньшей размерности.

В модели Кронекера корреляционная матрица на приемной стороне вычисляется в виде

$$R_{RX} = E \{ H H^H \},$$

на передающей стороне – в виде

$$R_{TX} = E \{ H^T H^* \}.$$

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

$$R_H = R_{TX} \otimes R_{RX}.$$

Матрицы корреляции на приемной и передающей стороне 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

$$H_{kron} = R_{TX}^{1/2} H_w R_{RX}^{1/2},$$

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.

Предположение о независимости между параметрами многолучевых компонент на передающей и приемной стороне 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 стороне:

$$R_{RX} = U_{RX} \Lambda_{RX} U_{RX}^H,$$

$$R_{TX} = U_{TX} \Lambda_{TX} U_{TX}^H,$$

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

$$H_{weich} = U_{RX} (\tilde{\Omega} \cdot H_w) U_{TX}.$$

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 [3].

Модели Кронекера и Вайхсельбергера получили широкое распространение как в теоретических работах по изучению различных алгоритмов обработки сигналов ММО, так и при экспериментальных измерениях и проверке точности моделирования каналов связи.

В данной работе для построения аналитической модели канала ММО предложено использовать аппроксимацию полной корреляционной матрицы канала суммой произведений Кронекера. Данная аппроксимация используется при моделировании корреляционных матриц сигналов датчиков в системах ЭЭГ и МЭГ, радаров с синтезированной апертурой.

В отличие от моделей Кронекера и Вайхсельбергера в данной модели полная корреляционная матрица аппроксимируется суммой произведений Кронекера матриц, представляющих не отдельные корреляционные матрицы на приемной и передающей стороне, а матриц, которые являются решениями задачи по методу наименьших квадратов.

Возможность использования оптимальной аппроксимации полной корреляционной матрицы через сумму произведений Кронекера при построении моделей канала ММО указана в работах [2, 3]. Но экспериментальное определение параметров моделей и подтверждение качества моделирования было проведено в незначительном числе работ [4]. Поэтому задача определения параметров модели по данным измерений канала и проверка точности моделирования радиоканала в различных условиях распространения являются актуальными.

Полная корреляционная матрица в виде аппроксимации представляется как сумма произведений Кронекера в виде

$$R_H = \sum_{n=1}^N T_n \otimes X_n$$

и определяется численными методами с учетом требования минимальной разности между исходной корреляционной матрицей канала и ее аппроксимацией:

$$C_{LS} = \left\| R_H - \sum_{n=1}^N T_n \otimes X_n \right\|^2.$$

Для решения задачи поиска аппроксимации корреляционной матрицы при заданной полной корреляционной матрице используется численный алгоритм Ван Лоана и Питсаниса [5]. Данный алгоритм определяет оптимальные оценки матриц X_n и T_n по методу наименьших квадратов с вычислением декомпозиции полной корреляционной матрицы по сингулярным числам (SVD).

Входящие в выражение суммы элементы матриц переставляются при помощи оператора перестановки $S: R^{IJ \times IJ} \rightarrow R^{I^2 \times J^2}$, что приводит к преобразованию выражения аппроксимации полной корреляционной матрицы к виду

$$S(R_H) = \sum_{n=1}^N \text{vec}(X_n) \otimes \text{vec}(T_n)^T$$

и находится минимум разности

$$C_{LS} = \left\| S(R_H) - \sum_{n=1}^N \text{vec}(X_n) \otimes \text{vec}(T_n)^T \right\|^2.$$

Выборочная корреляционная матрица после применения оператора перестановки записывается в виде

$$S(\hat{R}_H) = \sum_{n=1}^N H_n \otimes H_n.$$

Минимизация эквивалентна нахождению наилучшей аппроксимации матрицы $S(\hat{R}_H)$ матрицами рангом N , которая численно определяется через сингулярное разложение матрицы $S(\hat{R}_H)$, $S(\hat{R}_H) = U \Sigma V^T$, где $U \in R^{I^2 \times I^2}$, $V \in R^{J^2 \times J^2}$ – ортогональные матрицы, $\Sigma \in R^{I^2 \times J^2}$ – матрица сингулярных чисел. Аппроксимация матрицы $S(\hat{R}_H)$ матрицами рангом N , $N \leq \min(I, J)$, выражается в виде $S(\hat{R}_H) = \sum_{n=1}^N U_n \sigma_n V_n^T$, где U_n, V_n – столбцы с номером n в матрицах U, V .

Оценки матриц аппроксимации равны $\text{vec}(X_n) = U_n$, $\text{vec}(T_n) = \sigma_n V_n$.

После вычисления аппроксимации полной корреляционной матрицы модель канала ММО определяется в виде

$$H_{app} = \left(\sum_{n=1}^N T_n \otimes X_n \right)^{1/2} H_w.$$

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

2. Описание эксперимента

Измерения проводились в лабораторных условиях внутри помещения. Центральная частота излучаемого радиосигнала – 2.3 ГГц, ширина полосы частот сигнала – 100 МГц. Зондирующая последовательность Касами длительностью 16383 отсчета предварительно фильтровалась цифровым фильтром для получения спектра с меньшими внеполосными составляющими. Далее тестовая последовательность использовалась в векторном генераторе сигналов SMBV100A для формирования зондирующего радиосигнала с равномерным спектром. На приемной стороне сигнал обрабатывался анализатором спектра FSW26, позволяющим получать и записывать квадратурные отсчеты принятого сигнала.

Перед измерениями выполнена предварительная передача тестового сигнала от генератора на вход приемника без антенн, для последующей компенсации влияния входных цепей из результатов измерений. Записанный при этом сигнал являлся эталонным для взаимной корреляции при вычислении импульсных характеристик канала.

Выполнены измерения канала ММО в конфигурации четырех передающих и четырех приемных антенн. При измерениях антенны линейно передвигались с шагом $\frac{\lambda}{2}$, где λ – длина волны, см.

3. Результаты экспериментов

По полученным реализациям импульсных характеристик канала определены параметры моделей. Для модели Кронекера это корреляционные матрицы на передающей и приемной стороне, для модели Вайхсельбергера – матрицы собственных векторов на передающей и приемной стороне, по которым вычислена матрица связности. Для модели с аппроксимацией в виде суммы произведений Кронекера вычислялись оптимальные значения матриц T_n и X_n до величины пятого порядка.

Оценка полной корреляционной матрицы, отдельные корреляционные матрицы на передающей и приемной стороне были вычислены по множеству из 300 измеренных матриц канала H_n по выражениям:

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

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

$$\hat{R}_t = \frac{1}{NM_T} \sum_{n=1}^N H_n H_n^H.$$

Для модели Вайхсельбергера матрица связности была вычислена в виде

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

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

Наиболее широко в качестве критерия используется пропускная способность канала как самый важный показатель системы связи [4–6].

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:

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

Аналитические корреляционные модели должны точно аппроксимировать полную корреляционную матрицу канала, отображающую пространственную структуру канала. Поэтому критерием качества модели является минимальная ошибка аппроксимации полной корреляционной матрицы, вычисленной на основе измеренных импульсных характеристик и синтезированной R_{mod} по реализациям модели.

Ошибка аппроксимации вычисляется как

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

где $\|\cdot\|_F$ – норма Фробениуса.

Вычисленная по выражению ошибка аппроксимации полной корреляционной матрицы для различных конфигураций антенн для различных моделей канала показана в таблице.

Ошибка аппроксимации полной корреляционной матрицы

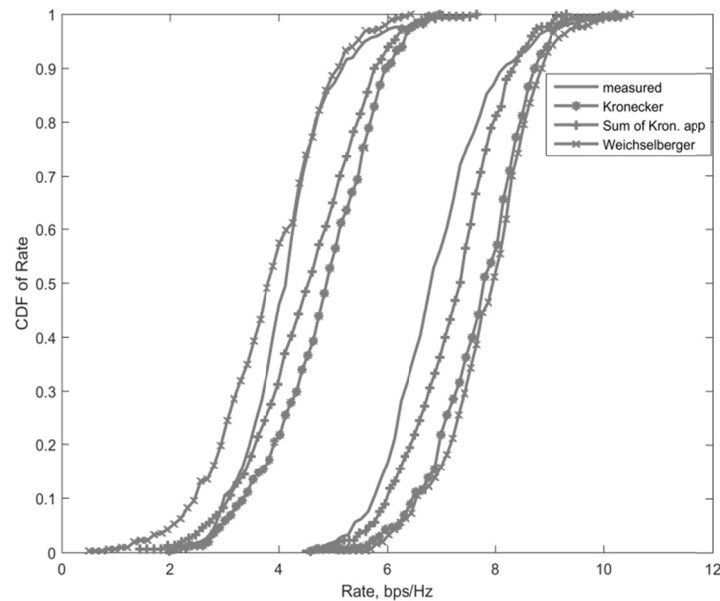
Модель	Конфигурации антенн					
	2×2			4×4		
Кронекера	0.032			0.075		
Вайхсельбергера	0.018			0.02		
Аналитическая с порядком аппроксимации n	$n = 1$	$n = 3$	$n = 5$	$n = 1$	$n = 3$	$n = 5$
	0.021	0.016	0.01	0.021	0.015	0.01

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, так как угловые спектры на передающей и приемной стороне уже не являются независимыми. Модель Вайхсельбергера учитывает зависимость пространственной корреляции на приемной и передающей стороне и обеспечивает меньшую ошибку аппроксимации.

Аналитическая модель с аппроксимацией суммой произведений Кронекера имеет минимальную ошибку аппроксимации, так как ее параметры вычислялись

исходя из требования минимизации нормы Фробениуса. При этом точность аппроксимации при увеличении количества антенн сохраняется.

Также по выражению была вычислена оценка пропускной способности каналов двух типов моделей. На рисунке показана функция распределения эргодической пропускной способности канала ММО для двух типов конфигурации антенн. В левой части графика показано распределение пропускной способности измеренного канала и трех аналитических моделей для $M_T = M_R = 2$. В правой части показано распределение пропускной способности измеренного канала и трех аналитических моделей для $M_T = M_R = 4$.



Функция распределения эргодической пропускной способности канала ММО

Cumulative distribution function of ergodic channel capacity for channel measurement data and channel models

Модель с оптимальной аппроксимацией явно не разделяет пространственную корреляцию на передающей и приемной стороне и позволяет более точно аппроксимировать полную корреляционную матрицу.

Заключение

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 стороной при аналитическом моделировании каналов связи ММО.

Модель с оптимальной аппроксимацией явно не разделяет пространственную корреляцию на передающей и приемной стороне и позволяет более точно моделировать канал ММО по критерию минимума нормы Фробениуса разности матриц и по распределению эргодической пропускной способности. Дальнейшее

уточнение точности моделирования следует провести с учетом воспроизведения пространственной структуры канала, совместного углового спектра мощности.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems / P. Almers, E. Bonek, A. Burr, N. Czink, M. Debbah, V. Degli-Esposti, H. Hofstetter, P. Kyösti, D. Laurenson, G. Matz, A.F. Molisch, C. Oestges, H. Özcelik // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2007. – Vol. 2007. – P. 019070.
2. A stochastic MIMO channel model with joint correlation of both link ends / W. Weichselberger, M. Herdin, H. Özcelik, E. Bonek // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2006. – Vol. 5 (1). – P. 90–100.
3. **Costa N., Haykin S.** A novel wideband MIMO channel model and experimental validation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008. – Vol. 56. – P. 550–562.
4. **Han B., Zheng Y.** Higher rank principal Kronecker model for triply selective fading channels with experimental validation // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2015. – Vol. 64 (5). – P. 1654–1663.
5. **Loan C. van, Pitsianis N.** Approximation with Kronecker products // Linear Algebra for Large Scale and Real Time Applications. – Dordrecht, Netherlands: Kluwer, 1993. – P. 293–314.
6. **Aleksiejunas R.** MIMO channel reconstruction from lower dimensional multiple antenna measurements // Wireless Personal Communications. – 2017. – Vol. 96. – P. 543–562.

CONSTRUCTION OF ANALYTICAL WIRELESS MIMO CHANNEL MODEL BASED ON FULL CORRELATION MATRIX APPROXIMATION

Kalachicov A.A., Shelkunov N.S.

*Siberian State University of Telecommunications
and Information Sciences, Novosibirsk, Russia*

This paper addresses the experimental wireless MIMO channel modeling and validation based on channel sounding data using the approximation of the full channel correlation matrix. Measurement were carried out in indoor laboratory environment at central frequency 2.3 GHz. An analytical MIMO channel model is presented based on optimal approximation of channel covariance matrix. Approximation of a full channel covariance matrix is based on the optimal Kronecker product series expansion of the sample covariance matrix. The channel correlation matrices calculated from the measured channel coefficients were decomposed using Van Loan and Pitsanis approximation algorithm. Experimental validation of such model is presented. The accuracy of the MIMO channel modeling was evaluated by the correlation matrix distance and by calculating of CDF of channel capacity. The results show that these models have good agreement with the MIMO channel measured data. Also two popular analytical MIMO channel models – Kronecker and Weichselberger models are evaluated and compared with the presented channel model.

Keywords: MIMO channel sounder, channel parameter estimation, full channel correlation matrices, MIMO channel capacity, analytical MIMO channel model, optimal sum of Kronecker product approximation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-52-61

REFERENCES

1. Almers P., Bonek E., Burr A., Czink N., Debbah M., Degli-Esposti V., Hofstetter H., Kyösti P., Laurenson D., Matz G., Molisch A.F., Oestges C., Özcelik H. Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007, vol. 2007, p. 019070.
2. Weichselberger W., Herdin M., Özcelik H., Bonek E. A stochastic MIMO channel model with joint correlation of both link ends. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, vol. 5 (1), pp. 90–100.
3. Costa N., Haykin S. A novel wideband MIMO channel model and experimental validation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, vol. 56, pp. 550–562.
4. Han B., Zheng Y. Higher rank principal Kronecker model for triply selective fading channels with experimental validation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, vol. 64 (5), pp. 1654–1663.
5. Loan C. van, Pitsianis N. Approximation with Kronecker products. *Linear Algebra for Large Scale and Real Time Applications*. Dordrecht, Netherlands, Kluwer, 1993, pp. 293–314.
6. Aleksiejunas R. MIMO channel reconstruction from lower dimensional multiple antenna measurements. *Wireless Personal Communications*, 2017, vol. 96, pp. 543–562.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Калачиков Александр Александрович – родился в 1977 году, канд. техн. наук, работает на кафедре радиотехнических систем Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Область научных интересов – обработка сигналов, измерение и оценка параметров радиоканалов. (Адрес: 630102, Россия, Новосибирск, Кирова, 86. E-mail diff32@rambler.ru).

Kalachikov Alexander Alexandrovich – is currently works at chair RTS, SibSUTIS. His current research interests include statistical signal processing, MIMO channel measurement, radio channel characterization and channel parameter estimation. (Address: 86, Kirova St., Novosibirsk, Russia. E-mail: diff32@rambler.ru).



Щелкунов Николай Сергеевич – аспирант кафедры радиотехнических систем Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Область научных интересов – измерение и оценка параметров радиоканалов. (Адрес: 630102, Россия, Новосибирск, Кирова, 86. E-mail shns@ngs.ru).

Shelkunov Nikolay Sergeevich – is currently working towards the Ph.D. degree on chair RTS SibSUTIS. His current research interests include radio channel characterization and modeling, RF measurement techniques. (Address: 86, Kirova St., Novosibirsk, Russia. E-mail: diff32@rambler.ru).

Статья поступила 11 мая 2020 г.
Received May 11, 2020

To references:

Kalachikov A.A., Shchelkunov N.S. Postroenie analiticheskoi modeli radiokanala MIMO na osnove approksimatsii polnoi korrelyatsionnoi matritsy [Construction of analytical wireless MIMO channel model based on full correlation matrix approximation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 3 (48), pp. 52–61. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-52-61.