

УДК 621.396.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ РАДИОКАНАЛА МІМО

А.А. Калачиков, Н.С. Щелкунов

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

В статье рассматриваются методика и результаты экспериментального измерения параметров радиоканала МІМО, выполненные в условиях распространения внутри помещений. Измерения проведены на частоте 2,4 ГГц в полосе 100 МГц. Применяется корреляционный метод измерения импульсной реакции радиоканала, в качестве зондирующего сигнала используется кодовая последовательность Касами с хорошими автокорреляционными свойствами. Получен набор импульсных характеристик в системе с 4 передающими и 4 приемными антеннами с интервалом между антеннами, равным длине волны и половине длины волны. По полученным данным вычислены параметры многолучевого распространения, пространственная корреляция коэффициентов передачи для разных антенн, вычислена пропускная способность измеренного канала в двух конфигурациях с приведением функций распределения пропускной способности. Проводится анализ распределения модуля измеренных коэффициентов передачи матрицы канала МІМО с применением критерия согласия хи-квадрат. Вычислены полная корреляционная матрица канала и ее собственные значения. Показано влияние коррелированности канала на пропускную способность по сравнению с некоррелированным каналом. По измеренным матрицам коэффициентов передачи показана возможность аппроксимации полной корреляционной матрицы приближением в виде произведения Кронекера отдельных корреляционных матриц на приемной и передающей стороне.

Ключевые слова: измерение (зондирование) радиоканалов МІМО, вероятностный анализ результатов измерений, оценка пропускной способности.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-43-52

Введение

Система связи МІМО – система, организованная антеннами на передающей стороне и на приемной. Использование нескольких антенн позволяет повысить пропускную способность в канале с независимым многолучевым распространением и замираниями [1, 2]. Повышение пропускной способности во многом зависит от условий распространения сигнала и статистических свойств канала МІМО. Изучение вероятностных свойств канала МІМО необходимо для построения точных моделей канала, отображающих основные его свойства, при разработке и исследовании различных алгоритмов модуляции, кодирования и коррекции сигналов при приеме.

В настоящее время для экспериментальной проверки этих фактов активно проводятся исследования на разных частотных диапазонах, при различных условиях распространения и конфигурациях антенн [3, 4]. По измеренным данным строятся модели каналов и уточняются их параметры. Измерение совокупности импульсных характеристик канала МІМО (зондирование канала) является основной задачей данной работы и в дальнейшем используется при моделировании канала МІМО.

Импульсные характеристики радиоканала ММО измеряются корреляционным методом. Результаты измерений используются для последующей обработки и оценки параметров радиоканала ММО с многолучевым распространением сигналов.

1. Описание и методы измерений канала ММО

В общем виде канал ММО с многолучевым распространением зависит от времени и его можно описать системной матрицей преобразования входного сигнала:

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

Каждый из коэффициентов $h_{mn}(t, \tau)$ представляет собой импульсную реакцию от передающей n к приемной m антенне с учетом многолучевого характера распространения и зависит от t – времени излучения зондирующего сигнала и τ – времени рассеяния канала, реакции канала на зондирующий сигнал [5, 6].

Сигнал на выходе канала связи ММО с многолучевым распространением выражается как

$$r(t) = \int_{\tau} H(t, \tau) s(t - \tau) d\tau + n(t).$$

По полученным через преобразование Фурье частотным характеристикам канала $H_{mn}(t, f)$ можно оценить удельную пропускную способность $C(t, f)$ системы связи ММО при условии равномерного распределения мощности на передающей стороне по всем антеннам:

$$C(t, f) = \log_2 \left(\det \left(I_m + \frac{\rho}{m} H(t, f) H^H(t, f) \right) \right), \quad (1)$$

где $I_m \in C^{m \times n}$ – единичная матрица; ρ – среднее отношение сигнал/шум на каждой приемной антенне; $H(t, f) \in C^{m \times n}$ – нормированная матрица комплексных коэффициентов передачи канала для частоты f ; $(\cdot)^H$ – операция комплексного сопряжения и транспонирования.

При измерении импульсных характеристик канала по корреляционному принципу на передающей стороне формируется тестовый псевдослучайный сигнал с хорошими корреляционными свойствами. Принятый сигнал в виде квадратурных отсчетов сворачивается с переданным сигналом, в результате чего вычисляется комплексная импульсная характеристика канала. Точность измерения импульсной характеристики зависит от корреляционных свойств зондирующего сигнала, периода его повторения, равномерности спектра зондирующего сигнала, в пределах полосы частот измеряемого радиоканала.

Измеренные импульсные характеристики канала далее используются для вероятностного анализа коэффициентов передачи и вычисления корреляционных функций матриц канала.

Общая схема реализации системы для зондирования радиоканала ММО представлена на рис. 1.



Рис. 1 – Принцип зондирования радиоканала

Fig. 1 – Channel sounding principle

Для обеспечения точности проведения измерений необходимо выполнять ряд следующих требований для используемого зондирующего сигнала:

- 1) для повышения разрешающей способности во времени спектр зондирующего сигнала должен быть равномерным во всей полосе измерений;
- 2) длительность сигнала не должна быть больше интервала когерентности канала, т. е. времени, в течение которого канал остается постоянным. После начального зондирующего импульса следующий зондирующий импульс должен быть излучен после того, как полностью прекратится импульсная реакция канала;
- 3) хорошие корреляционные свойства зондирующего сигнала. Автокорреляционная функция зондирующего сигнала должна обладать большим отношением пикового значения уровня боковых лепестков. Данное условие является необходимым при проведении зондирования радиоканала ММО во временной области.

Для проведения зондирования радиоканала ММО применяется коммутация СВЧ сигналов по передающим и приемным антеннам.

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 [7] длительностью 16 383 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 выполнением измерений была проведена 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 выполнения взаимной корреляции при вычислении импульсных характеристик канала.

Были выполнены измерения канала ММО в конфигурации 4 передающих и 4 приемных антенны. При измерениях антенны линейно передвигались с шагом

λ и $\frac{\lambda}{2}$, где λ – длина волны, см.

3. Результаты экспериментов

Для каждой комбинации антенн получены импульсные характеристики радио-канала. Для последующей обработки используются 300 характеристик, которые выравнивались по начальным отсчетам.

Выборка из совокупности измеренных импульсных характеристик канала для пары передающей и приемных антенн ($h_{11}(t, \tau)$) показана на рис. 2.

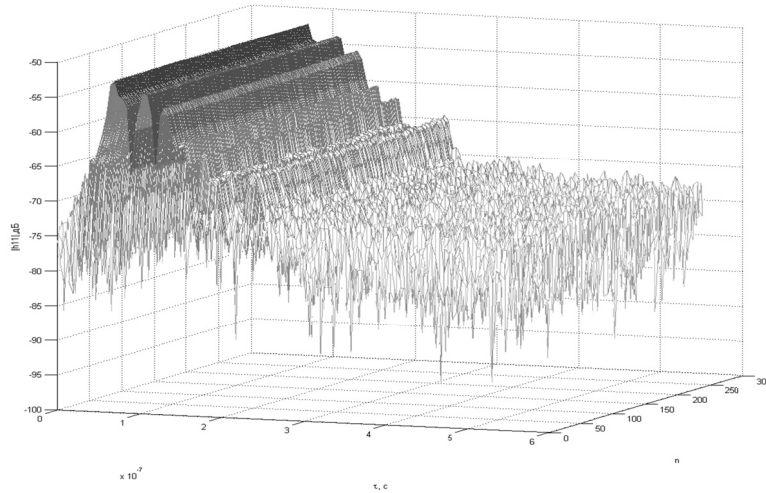


Рис. 2 – Измеренная импульсная характеристика канала для выборочной пары передающей и приемных антенн

Fig. 2 – Measured channel impulse response for selected transmit and received antennas

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 [5, 6]. Измеренные импульсные характеристики были усреднены по каждому сочетанию антенн по всем измерениям. После этого было определено численное 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 полученным импульсным характеристикам был вычислен профиль задержек мощности канала и определены его числовые значения: $\bar{\tau} = 6,2 \cdot 10^{-8}$ с и $\tau_{rms} = 1,9 \cdot 10^{-8}$ с.

Значения коэффициентов пространственной корреляции зависят как от условий распространения, так и от архитектуры применяемых антенн, от выбора первого элемента, относительно которого ведется вычисление.

Численно пространственная корреляция вычислялась по значениям задержки самого мощного луча в импульсной характеристике по выражению

$$\rho(\Delta x) = \frac{E\left[\left(h_{i,j} - E(h_{i,j})\right)\left(h_{i,j+\Delta x} - E(h_{i,j+\Delta x})\right)\right]}{\sqrt{E\left[\left|h_{i,j} - E(h_{i,j})\right|^2\right]E\left[\left|h_{i,j+\Delta x} - E(h_{i,j+\Delta x})\right|^2\right]}}$$

где $E[\]$ – операция вычисления среднего значения; Δx – величина смещения по положению антенн.

Полученные зависимости пространственной корреляции на приемной (рис. 3) и передающей (рис. 4) стороне можно объяснить различным угловым рассеянием сигналов. На передающей стороне применялась линейная антенная решетка, вокруг передающей антенны практически не было источников переотражений. Сохранение значительного уровня пространственной корреляции на передающей стороне при увеличении расстояния между элементами антенны объясняется малым угловым рассеянием сигналов, вызванным наличием переотражателей сигналов и их взаимным расположением.

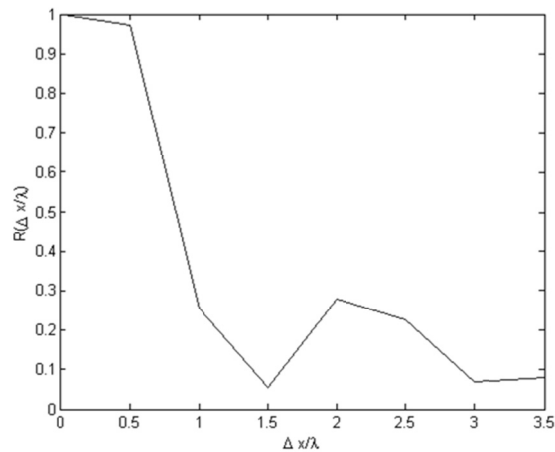


Рис. 3 – Пространственная корреляции на приемной стороне

Fig. 3 – Spatial correlaton on received site

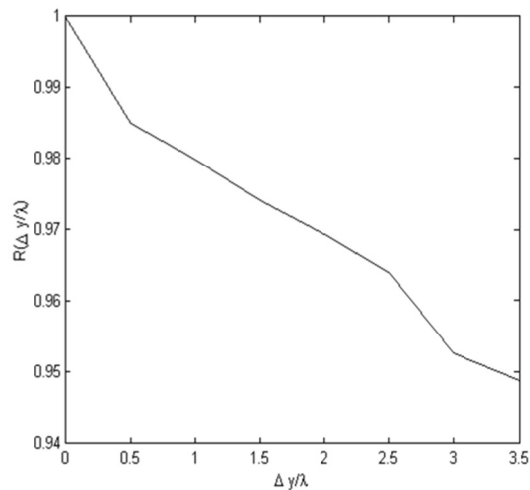


Рис. 4 – Пространственная корреляции на передающей стороне

Fig. 4 – Spatial correlaton on transmit site

Принимаемые сигналы обладали большим угловым рассеянием, вызванным наличием большого числа переотражающих элементов сигналов в помещении, что приводит к снижению уровня пространственной корреляции на приемной стороне.

Важным параметром канала является достижимая пропускная способность, которая зависит от реальных условий распространения. Реальные каналы отличаются пространственной коррелированностью, которая приводит к снижению пропускной способности.

Полученные матрицы коэффициентов передачи узкополосного канала – случайные величины, вычисляемая на их основе пропускная способность – также случайная величина. Для вероятностного описания полученной пропускной способности применяются функция распределения пропускной способности и средняя величина удельной пропускной способности с усреднением по большому числу реализаций (измерений) канала на интервале стационарности. Для величины отношения сигнал/шум $\rho = 12$ дБ по нормированным матрицам коэффициентов передачи канала получены функции распределения удельной пропускной способности измеренного канала (1) при конфигурации $N_T \times N_R = 2 \times 2$ и $N_T \times N_R = 4 \times 4$ (рис. 5)

Вычислено соответствующее множество комплексных частотных характеристик по всем импульсным характеристикам. Для вычисления пропускной способности узкополосного канала вся полоса частот измерений 100 МГц разбивается на набор узкополосных каналов с шириной полосы частот меньше полосы когерентности канала. В произвольно выбранном узкополосном канале вычислялась полная пространственная корреляционная матрица канала R_H , которая учитывает корреляцию между всеми элементами матрицы канала H .

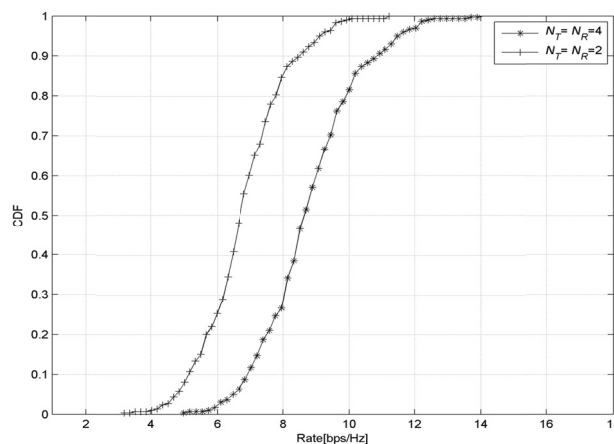


Рис. 5 – Функция распределения удельной пропускной способности измеренного канала

Fig. 5 – CDF of measured channel capacity

Визуальное отображение полной корреляционной матрицы показано на рис. 6. Светлые области сильной корреляции соответствуют преобладанию сигналов прямой видимости между антеннами и наличию регулярной составляющей в сигнале.

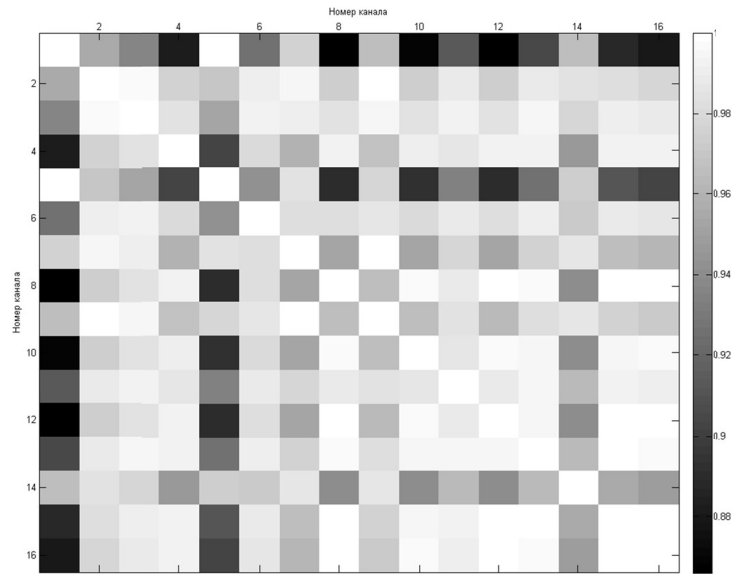


Рис. 6 – Полная пространственная корреляционная матрица канала

Fig. 6 – Full channel spatial correlation matrix

При помощи полученной полной пространственной корреляционной матрицы канала становится возможной оценка параметров канала, допустимой пропускной способности и проверки возможности реализации в канале пространственного мультиплексирования. Также были вычислены собственные значения λ_i полной корреляционной матрицы канала R_H . Обнаружен большой разброс собственных значений корреляционной матрицы.

Для построения моделей каналов MIMO необходимо определить вид и параметры распределения измеренных коэффициентов матрицы канала H . Для этого используются различные методы оценивания и статистические тесты [8]. В данной работе для определения параметров распределения использовался тест хи-квадрат для проверки гипотезы о форме распределения. Проводилось тестирование на соответствие распределения модуля коэффициента передачи закону Рэлея. При уровне значимости $\alpha = 0,01$ получены значения $h = 0$, $p = 0,4605$. Таким образом, принимается гипотеза о распределении Рэлея.

Для оценки влияния пространственной корреляции в канале на пропускную способность по полученным корреляционным матрицам была вычислена пропускная способность канала.

По сравнению с идеальной моделью канала наличие пространственной корреляции снижает пропускную способность канала (рис. 7).

Целью проведения измерений являлось получение реализаций импульсных характеристик для проведения последующего моделирования каналов. Наиболее распространенная модель канала MIMO основана на аппроксимации полной корреляционной матрицы R_H матрицами корреляций на приемную и передающую

сторону $R_R = E\{HH^H\}$ и передающей стороне $R_T = E\{H^H H\}^T$ в виде произведения Кронекера $R_H = R_T \otimes R_R$. При этом предполагается, что приемную и передающую

щую антенны можно считать некоррелированными. Качество приближения полной корреляционной матрицы ее аппроксимацией оценивается относительной нормой Фробениуса разности полной корреляционной матрицы и ее аппроксимации:

$$\psi(R_H, R_T \otimes R_R) = \frac{\|R_H - R_T \otimes R_R\|_F}{\|R_H\|_F}.$$

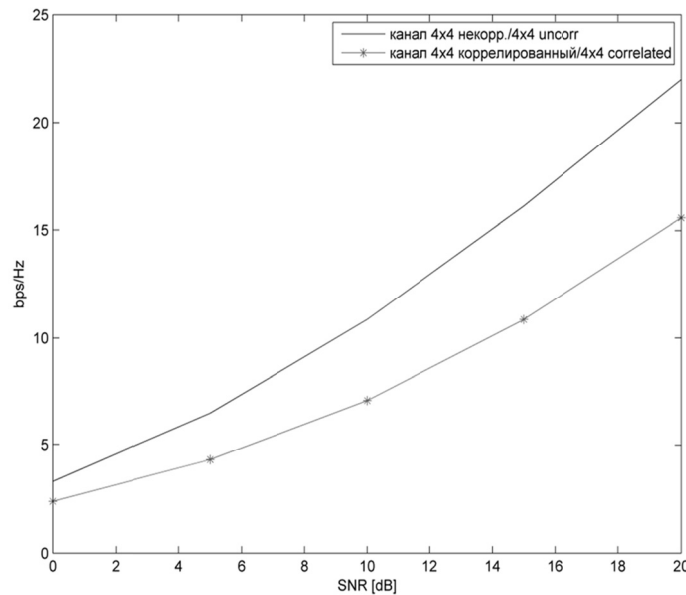


Рис. 7 – Влияние пространственной корреляции на пропускную способность канала

Fig. 7 – Effect of channel spatial correlation on channel capacity

Величина ошибки была вычислена для систем 2×2 и 4×4 . Для системы 2×2 величина ошибки $\psi = 0,056$. Для системы 4×4 величина ошибки $\psi = 0,0735$. 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.

Заключение

В результате экспериментальных измерений получены реализации импульсных характеристик каналов, которые были использованы для статистического анализа параметров канала. Условия распространения внутри помещения при измерениях таковы, что имеется значительная пространственная корреляция между коэффициентами матрицы канала.

Выполнена оценка полной корреляционной матрицы канала, результаты показаны в виде диаграммы распределения значений коэффициентов корреляции между всеми антеннами. Высокая корреляция не позволяет получить большой выигрыш от пространственного мультиплексирования и необходимо исследование

на возможность предкодирования для реализации пространственного мультиплексирования.

Полученные реализации импульсных характеристик далее используются при разработке реалистичных моделей каналов ММО.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Foschini G.J., Gans M.J.** On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas // *Wireless Personal Communications*. – 1998. – Vol. 6, N 3. – P. 311–315.
2. **Telatar E.** Capacity of multi-antenna Gaussian channels // AT&T Bell Laboratories Internal Technical Memorandum, June 1995.
3. 5.3-GHz MIMO radio channel sounder / V.-M. Kolmonen, J. Kivinen, L. Vuokko, P. Vainikainen // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2006. – Vol. 55, N 4. – P. 1263–1269.
4. Capacity results from short range fixed MIMO measurements at 5.2 GHz in urban environment / N. Skentos, A.G. Kanatas, G. Pantos, P. Constantinou // *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Paris, 20–24 June 2004. – Piscataway, NJ: IEEE, 2004. – Vol. 5. – P. 3020–3024.
5. **Costa N., Haykin S.** Multiple-input multiple-output channel models: theory and practice. – Hoboken, NJ: Wiley, 2010. – 225 p.
6. **Molisch A.** *Wireless communications*. – 2nd ed. – Chichester, West Sussex, UK: Wiley: IEEE, 2011. – 844 p.
7. **Sarwate D.V., Pursley M.B.** Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences // *Proceedings IEEE*. – 1980. – Vol. 68, N 5. – P. 583–619.
8. **Balakrishnan N., Voinov V., Nikulin M.** Chi-squared goodness of fit tests with applications. – Amsterdam: Elsevier, 2012. – 648 p.

EXPERIMENTAL MEASUREMENT AND ANALYSIS OF MIMO RADIO CHANNEL PARAMETERS

Kalachikov A.A., Shelkunov N.S.

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

This paper addresses the wireless MIMO channel sounding method based on the time domain cross correlation principle. Measurements are conducted in the indoor laboratory environment at the central frequency of 2.3 GHz with a measurement bandwidth of 100 MHz, 4 transmitting and 4 receiving antennas were used. The obtained pulse responses are presented and used for channel parameters estimation. The measured channel capacity CDF curves are also presented. A full channel correlation matrix and its eigenvalues are calculated showing a significant spatial correlation. For statistical analysis the distribution of channel coefficients and goodness of fit tests are numerically computed. The correlated channel capacity is also compared with the uncorrelated channel capacity.

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

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-43-52

REFERENCES

1. Foschini G.J., Gans M.J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications*, 1998, vol. 6, no. 3, pp. 311–315.

2. Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *AT&T Bell Laboratories Internal Technical Memorandum*, June 1995.
3. V.-M. Kolmonen, J. Kivinen, L. Vuokko, P. Vainikainen. 5.3-GHz MIMO radio channel sounder. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, vol. 55, no. 4, pp. 1263–1269.
4. Skentos N., Kanatas A.G., Pantos G., Constantinou P. Capacity results from short range fixed MIMO measurements at 5.2 GHz in urban environment. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Paris, 20–24 June 2004, vol. 5, pp. 3020–3024.
5. Costa N., Haykin S. *Multiple-input multiple-output channel models: theory and practice*. Hoboken, NJ, Wiley, 2010. 225 p.
6. Molisch A. *Wireless communications*. 2nd ed. Chichester, West Sussex, UK, Wiley, IEEE, 2011. 844 p.
7. Sarwate D.V., Pursley M.B. Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences. *Proceedings IEEE*, 1980, vol. 68, no. 5, pp. 583–619.
8. Balakrishnan N., Voinov V., Nikulin M. *Chi-squared goodness of fit tests with applications*. Amsterdam, Elsevier, 2012. 648 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Калачиков Александр Александрович, 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, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, Email: diff32@rambler.ru).

Kalachikov A.A. 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, 630102, Russia, Email: 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, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, Email: shns@ngs.ru).

Shelkunov N.S. 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, 630102, Russia, Email: shns@ngs.ru).

Статья поступила 25 июня 2017 г.
Received June 25, 2017

To Reference:

Kalachikov A.A., Shelkunov N.S. Eksperimental'noe izmerenie i analiz parametrov radiokanala MIMO [Experimental measurement and analysis of MIMO radio channel parameters]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 2 (35), pp. 43–52. doi: 10.17212/1727-2769-2017-2-43-52