

11. Krizhevsky A., Sutskever I., and Hinton G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2012, Vol. 25.
12. Simonyan K. u Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition, *arXiv preprint arXiv:1409.1556*, 2015.
13. He K., Zhang X., Ren S., u Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770-778.
14. Kendall A., Grimes M., Cipolla R. PoseNet: A Convolutional Network for Real-Time 6-DOF Camera Relocalization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015.
15. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A. et al. An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale, *arXiv preprint*, 2020.
16. Arandjelović R., Gronat P., Torii A., Pajdla T., & Sivic J. NetVLAD: CNN architecture for weakly supervised place recognition, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 5297-5307.
17. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / In: Navab, N., Hornegger, J., Wells, W., Frangi, A. (eds), *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9351. Springer, Cham, 2015. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28).
18. Ulmas Priit & Liiv Innar. (2020). Segmentation of Satellite Imagery using U-Net Models for Land Cover Classification, *10.48550/arXiv.2003.02899*.
19. Yadavendra S., Chand S. Semantic segmentation and detection of satellite objects using U-Net model of deep learning, *Multimed Tools Appl.*, 2022, 81, pp. 44291-44310. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11042-022-12892-2>.
20. Eric Marchand, Hideaki Uchiyama, and Fabien Spindler. Pose Estimation for Augmented Reality: A Hands-On Survey, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, December 2016, 22 (12), pp. 2633-2651.
21. Martin A. Fischler and Robert C. Bolles. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Comm. of the ACM: journal*, 1981, June (Vol. 24), pp. 381-395. doi: 10.1145/358669.358692.

**Будко Артем Юрьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: abudko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371694; с.н.с. НИИ РИПУ; доцент.

**Гайда Татьяна Александровна** – Южный федеральный университет; e-mail: gaidatat@mail.ru; г. Таганрог, Россия; инженер.

**Понимаш Захар Алексеевич** – Южный федеральный университет; e-mail: ponimashz@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79885464739; аспирант; генеральный директор ООО «ФракталТех».

**Budko Artem Yuryevich** – Southern Federal University; e-mail: abudko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; senior researcher.

**Gaida Tatyana Aleksandrovna** – Southern Federal University; e-mail: gaidatat@mail.ru; Taganrog, Russia; engineer.

**Ponimash Zahar Alekseevich** – Southern Federal University; e-mail: ponimashz@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885464739; graduate student; general director of FractalTech LLC.

УДК 621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2026-1-86-96

**М.В. Грачев, Ю.Н. Паршин**

### **ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ МОБИЛЬНОЙ ММО СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ**

*Рассматривается излучение и прием электромагнитной волны в сплошной неоднородной среде подвижным источником и приемником. На основе лучевой теории проведен расчет коэффициента передачи сигнала от источника к приемнику в зависимости от их положения в пространстве и параметров неоднородности среды. Совокупность коэффициентов передачи для нескольких передающих и приемных пунктов составляет матрицу канальных коэффициентов ММО системы передачи информации. Проведен спектральный анализ канальных коэффициентов в зависимости от параметров движения передающих и приемных пунктов. Установлено отличие спектра*

в однородной и неоднородной средах. Полученные спектры существенно отличаются от классического спектра Джейкса, что подчеркивает необходимость учета неоднородной структуры среды при моделировании современных ММО систем. Исследуются флуктуации канальных коэффициентов, обусловленные пространственной неоднородностью среды, а также влияние скорости и направления движения передатчика и приемника на спектральные характеристики канала. Проведен расчет эргодической пропускной способности ММО системы передачи информации при движении в неоднородной сплошной среде. Показано, что сложная структура среды формирует непостоянное распределение амплитуд и фаз многолучевых сигналов, что приводит к немонотонным изменениям пропускной способности. Установлено, что максимальная пропускная способность достигается при совпадении направления движения с направлением центра пучка лучей. Показано, что при ортогональной ориентации вектора скорости к пучку лучей модуль скорости движения практически не влияет на характеристики канала. Результаты исследования позволяют более точно учитывать физический характер среды и динамику движения источников, что важно для проектирования адаптивных методов обработки сигналов и оптимизации ММО систем нового поколения. Представленные зависимости могут быть использованы для повышения надежности передачи данных и максимизации пропускной способности в условиях мобильности передатчика сигнала в неоднородной сплошной среде.

*Сплошная неоднородная среда; движущийся источник излучения; ММО система передачи информации; пропускная способность.*

M.V. Grachev, Yu.N. Parshin

#### A CAPACITY OF MOBILE MIMO COMMUNICATION SYSTEM IN INHOMOGENEOUS MEDIUM

*The propagation and reception of electromagnetic waves in a continuous, heterogeneous medium by mobile sources and receivers is considered. Based on ray theory, the calculation of signal transmission coefficients from the source to the receiver, depending on their positions in space and parameters of medium heterogeneity, is carried out. A set of transmission coefficients for multiple transmitting and receiving points constitute a matrix of MIMO channel coefficients for an information transmission system. Spectral analysis of channel coefficients, depending on motion parameters of transmitting and receiving points, has been performed. The difference in spectrum in homogeneous and heterogeneous media has been determined. The obtained spectra significantly differ from the classical Jakes spectrum, emphasizing the need to account for heterogeneous structure of medium in modeling of modern MIMO systems. Fluctuations in channel coefficients due to spatial heterogeneity of the medium have been investigated, as has the influence of the speed and direction of movement of the transmitter and receiver on the spectral properties of the channel. When moving in a heterogeneous continuous medium, the ergodic capacity of a MIMO information transmission system has been calculated. It has been demonstrated that the complex nature of the medium leads to an unstable distribution of amplitudes and phases for multipath signals, resulting in non-monotonic variations in bandwidth. Maximum capacity has been found to occur when the direction of movement coincides with that of the beam center. It has also been shown that when the velocity vector is orthogonal to the beam direction, the velocity magnitude has a negligible effect on channel properties. The findings of the study allow for a more accurate consideration of the physical characteristics of the environment and the dynamic behavior of sources, which is crucial for developing adaptive signal processing techniques and optimizing MIMO systems of the next generation. The provided dependencies can be utilized to enhance the reliability of data transmission and maximize the throughput in situations where the signal transmitter is mobile within an inhomogeneous and continuous environment.*

*Continuous inhomogeneous medium; moving radiation source; MIMO information transmission system; capacity.*

**Введение.** Повышение требований к эффективности систем передачи информации стимулировало исследования в области более полного учета характеристик среды распространения радиоволн. Результатом проведенных исследований является создание технологии ММО [1], учитывающей преобразование сигнала при его распространении от каждой передающей антенны к каждой приемной антенне. При этом для описания свойств среды распространения используются различные модели, основанные на предположении об однородности среды. В работах [2, 3] исследуются характеристики канальных матриц с использованием геометрических и статистических моделей. Как пра-

вило, геометрические моделирование предполагает, что среда распространения однородная, а многолучевость является следствием локальных неоднородностей. Различные модели среды распространения приведены также в стандарте COST 259.

Вместе с тем воздействие температуры, примесей различной концентрации и других факторов изменяют характер распространения сигнала, что влияет на характеристики ММО системы передачи информации. В работах [4, 5] исследуется пропускная способность неподвижной ММО системы в неоднородной сплошной среде, характеризуемой градиентом диэлектрической проницаемости. Установлено, что неоднородность среды вызывает многолучевый характер распространения сигнала, что необходимо учитывать при создании алгоритмов пространственного кодирования и декодирования. Неоднородность среды может быть существенным фактором работы в системах передачи информации IoT [6, 7].

Известны работы, в которых рассматривается влияние неоднородностей среды на характеристики ММО-канала при статических условиях. В работе [8] проведено моделирование ММО системы передачи информации в двухмерных неоднородных средах с помощью численных методов. Исследование эффекта Доплера в неоднородной среде показало, что неоднородности приводят к возникновению множественных путей распространения, каждый из которых вносит собственное смещение частоты [8, 10]. В работах [11–14] отмечено, что в неоднородной среде эффект Доплера имеет особенности, а смещение частоты зависит не только от радиальной скорости взаимного движения источника и приемника. Для ММО систем это означает, что при движении источника или приёмника флуктуации канального коэффициента будут формировать широкий спектр доплеровских флуктуаций, отличающийся от классических моделей однородной среды. В известных информационных источниках рассматривается влияние неоднородности среды в контексте беспроводных сенсорных сетей, где условия передачи могут значительно варьироваться на малых масштабах. Тем не менее, систематического учёта таких неоднородностей при оценке пропускной способности мобильных ММО систем в большинстве исследований пока нет. Основные работы по предмету касаются либо однородных моделей канала, либо статических сценариев с заданной геометрией среды.

Проводимое в данной работе исследование направлено на анализ характера флуктуаций канальных коэффициентов в неоднородной сплошной среде, а также расчет пропускной способности ММО системы передачи информации при движении передающей части системы. В отличие от ранее существовавших подходов, учитывается неоднородность среды непосредственно при моделировании канала ММО с движущимся передатчиком и анализом влияния скорости и направления движения на спектральный состав канальных флуктуаций и величину пропускной способности.

Целью данной работы является повышение пропускной способности ММО системы путем учета влияния неоднородности среды и характера движения мобильной системы передачи информации.

**Постановка задачи.** Для описания спектра многолучевого сигнала при его распространении от движущегося источника, где сигнал претерпевает искажения из-за множества отражений и рассеяний, используют модель Джейкса [15]. Классическое распределение Джейкса описывается следующим выражением [1] для спектральной плотности мощности сигнала:

$$S(f_d) = \begin{cases} \frac{A}{\sqrt{1 - (f_d/f_{d\max})^2}}, & |f_d| \leq f_{d\max}, \\ 0, & |f_d| > f_{d\max}, \end{cases}$$

где  $f_{d\max} = f_0 v/c$  – максимальное смещение частоты вследствие эффекта Доплера,  $f_0$  – частота сигнала,  $v$  – скорость движения объекта,  $c$  – скорость распространения ЭМВ (электромагнитной волны) в среде.

При анализе спектра принимаемого сигнала от движущегося передатчика необходимо учитывать ограничения: модель предполагает, что все пути распространения сигнала независимы и статистически одинаковы, что может не всегда быть верным при наличии сложных взаимодействий между лучами, например, фокусировки или усиления некоторых путей. Спектр Джейкса получен для однородной среды при условии, когда количество лучей многократно превышает единицу, а их влияние на общий сигнал можно рассматривать как случайный процесс с гауссовским распределением [16]. Таким образом, спектр Джейкса является важным инструментом для анализа радиосигналов в условиях многолучевого распространения с учетом доплеровских сдвигов частоты

В работе [4] установлено, что при распространении ЭМВ в неоднородной сплошной среде также наблюдается многолучевое распространение сигнала, обусловленное изменением электрических параметров среды. Сравнивая условия распространения ЭМВ в неоднородной среде и при расчете спектра Джейкса, можно отметить, что обе модели учитывают влияние многочисленных путей распространения ЭМВ с различными задержками и частотными сдвигами.

В работах [5, 6] с использованием лучевой теории распространения ЭМВ предложена модель неоднородной сплошной среды в виде слоистой структуры, которая состоит из плотно прилегающих слоев, разделенных плоскими границами. В этой структуре свойства среды изменяются вдоль одной из осей прямоугольной системы координат, оставаясь постоянными в плоскостях, перпендикулярных этой оси. При увеличении числа слоев и одновременно уменьшении толщины слоев такую среду распространения ЭМВ можно считать квазинепрерывно-слоистой.

Задача анализа распространения ЭМВ в данной структуре сводится к решению задач многократной дифракции на границах раздела двух сред. Так как для малой толщины слоя изменения свойств среды в слое минимальны, при моделировании амплитуды сигнала учитывается только преломленная составляющая луча в каждом слое, а отраженная составляющая учитывается только при выполнении условий полного внутреннего отражения [17, 18]. Фаза сигнала при прохождении границы раздела двух слоев не изменяется. Однако, при ее расчете учитывается геометрия траектории каждого луча, а также доплеровская составляющая фазы  $2\pi f_d t$ .

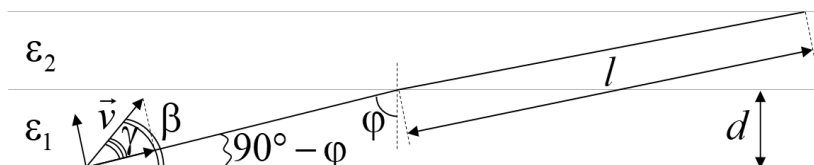


Рис. 1. Геометрия распространения сигнала от движущегося источника в неоднородной среде

На рис. 1 представлена геометрия траектории луча движущегося источника ЭМВ при прохождении границы раздела двух слоев. Угол  $\gamma$  между вектором скорости  $\vec{v}$  и лучом можно определить через угол между вектором скорости и границей раздела сред  $\beta$ , а также угол падения на границу раздела двух сред  $\varphi$ :

$$\gamma = \beta + \varphi - \frac{\pi}{2}.$$

Эти углы влияют на характер распространения сигнала, так как при определенных условиях они могут изменять величину сдвига частоты вследствие эффекта Доплера. Радиальная составляющая вектора скорости определяется как проекция вектора скорости на линию распространения сигнала в рассматриваемом слое:

$$V_r = V \cos \gamma = V \cos \left( \beta + \varphi - \frac{\pi}{2} \right),$$

где  $V$  – модуль скорости движения источника ЭМВ.

Канальный коэффициент ММО системы, описывающий изменение сигнала движущегося источника при его распространении в среде, зависит от условий распространения сигнала, которые могут быть изменены различными внешними факторами, такими как плотность среды или наличие препятствий, а также сдвигом частоты, который зависит от скорости движения источника излучения. С учетом этих факторов выражение для одного луча, регистрируемого неподвижным приемником, имеет вид:

$$s_{RX}(t) = s_{TX}(t)H e^{-j2\pi f_d t},$$

где  $f_d = \frac{f_0 V_r}{c_1}$  – смещение частоты сигнала вследствие эффекта Доплера,  $s_{TX}(t)$  ком-

плексная амплитуда излучаемого сигнала,  $H$  – канальный коэффициент, который зависит от свойств среды распространения,  $c_1$  – скорость распространения ЭМВ в 1-м слое. Если приемная антенна имеет апертуру конечных размеров, то выходной сигнал получается суммированием  $K$  лучей и определяется соотношением:

$$s_{RX}(t) = s_{TX}(t)H(t),$$

где  $H(t) = \sum_{k=1}^K H_k e^{-j2\pi f_{dk} t}$  – коэффициент передачи сигнала, изменяющийся во времени,

$f_{dk} = \frac{f_0 V}{c_1} \cos \gamma_k$  – доплеровский сдвиг частоты сигнала  $k$ -го луча,  $\gamma_k$  – угловое направ-

ление  $k$ -го луча относительно вектора скорости  $V$  излучателя.

На рис. 2 показаны траектории распространения ЭМВ при движении источника излучения со скоростью 40 м/с при различных угловых направлениях в среде с градиентом диэлектрической проницаемости  $6 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1}$ ; частота сигнала равна 3 кГц. Стрелки на рисунке указывают направление движения передатчика для угловых направлений  $\gamma = 3^\circ, 45^\circ, 83^\circ$ . При этом угловая координата  $\gamma = 3^\circ$  соответствует направлению центра прямой видимости приемной антенны из точки расположения передающей антенны. Направление  $\gamma = 83^\circ$  соответствует направлению центра пучка лучей, излучаемых передающей антенной и попадающих на апертуру приемной антенны.

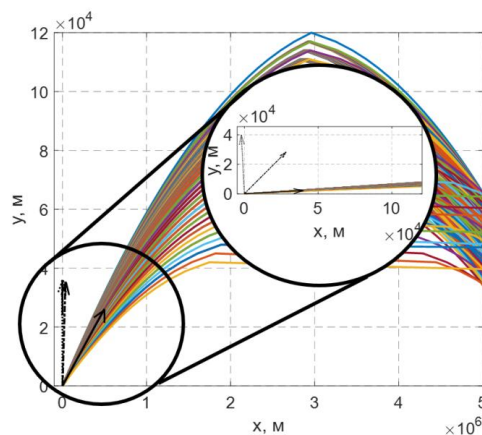


Рис. 2. Траектории ЭМВ и направление движения передатчика

Зависимость канального коэффициента ММО системы от скорости движения источника ЭМВ можно выразить через модуль скорости  $V$  и параметры среды, такие как диэлектрическая проницаемость, с учетом скорости доплеровского изменения фазы сигнала. Для модели с многослойным распространением сигнала фазовый сдвиг, возникающий вследствие движения источника, определяется как сумма сдвигов фаз, которые возникают в каждом из слоев среды [19, 20]. Каждая из этих фаз зависит от пути, который сигнал проходит через соответствующий слой среды. Этот сдвиг фазы зависит от параметров среды и скорости движения источника, что позволяет моделировать распространение ЭМВ в динамических условиях, таких как мобильные коммуникации или радиолокация.

**Анализ пропускной способности ММО системы в неоднородной среде.** В условиях неоднородной сплошной среды, где характеристики преломления и поглощения изменяются в пространстве, формируется сложная структура канала. Это оказывает прямое влияние на матрицу канальных коэффициентов ММО системы передачи информации и, следовательно, на максимально достижимую пропускную способность. Поэтому расчет пропускной способности в таких условиях требует учета суммарной амплитуды и фазы всех лучей, падающих на раскрыт приемных антенн, их волнового взаимодействия.

Необходимо отметить, что эргодическая пропускная способность рассчитывалась в результате усреднения во времени по реализациям канальных коэффициентов. Число значимых значений канальных коэффициентов, участвующих в усреднении пропускной способности, выбирается из условий некоррелированности этих значений на заданном интервале времени. Для заданной модели неоднородной сплошной среды число независимых значений канальных коэффициентов зависит от числа лучей на раскрыте приемной антенны. При проектировании систем беспроводной связи в неоднородных средах необходимо учитывать эти факторы для оптимизации характеристик передачи. Таким образом, пропускная способность ММО системы определяется путем усреднения пропускной способности по ансамблю реализаций канальных матриц

$\mathbf{H}_m = \begin{pmatrix} H_{11}(m\Delta t) & H_{12}(m\Delta t) \\ H_{21}(m\Delta t) & H_{22}(m\Delta t) \end{pmatrix}$  для 2-х передающих антенн и 2-х приемных антенн. Реализации канальных матриц получаются путем взятия отсчетов во времени через интервал, равный интервалу корреляции канальной матрицы  $\Delta t = \tau_c$ . Пропускная способность определяется для гауссовского непрерывного канала в соответствии с выражением [1]

$$C = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \log_2 \det \left( \mathbf{I} + \frac{q}{N_{TX}} \mathbf{H}_m^H \mathbf{H}_m \right),$$

где  $q$  – энергетический потенциал системы,  $N_{TX}$  – число передающих антенн,  $M$  – число реализаций канальной матрицы, используемых для усреднения,  $\mathbf{H}_m$  – матрица коэффициентов передачи  $H$  между парами  $N_{TX}$  передающих антенн и  $N_{RX}$  приемных антенн. Реализации канальной матрицы формируются из зависимости  $\mathbf{H}(t)$  в моменты времени, отстающими на интервал времени больше, чем интервал корреляции.

**Результаты моделирования.** Моделирование канальных коэффициентов проводилось для ММО с числом антенн  $N_{TX} = N_{RX} = 2$ ; частота сигнала  $f_0 = 3$  кГц. Передающие антенны располагаются в точках с координатами  $x_{TX1} = 0$ ,  $y_{TX1} = 0$ ,  $x_{TX2} = 0$ ,  $y_{TX2} = 0,5\lambda$ . Координаты приемной антенны  $x_{RX1} = 50\lambda$ ,  $y_{RX1} = 0$ ,  $x_{RX2} = 50\lambda$ ,  $y_{RX2} = 0,5\lambda$ . Эффективная длина антенн равна  $D = \frac{\lambda}{2\pi}$ . Моделирование проводилось при следующих параметрах приемной системы и среды распространения: область моделирования по вертикальной оси ограничена интервалом  $[0; 15\lambda]$  и разбита на 500 слоёв, диэлектрическая проницаемость среды изменяется в пределах  $\varepsilon = 5,1 \dots 5,4$ .

На рис. 3 приведены зависимости эргодической пропускной способности от скорости движения источника излучения для различных направлений движения передатчика  $\gamma$ ; энергетический потенциал системы равен  $q=70$  дБ.

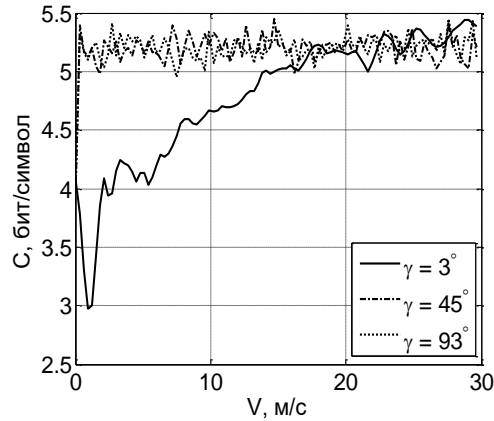


Рис. 3. Зависимость пропускной способности от скорости движения передатчика

Графики рис. 3 показывают, что влияние скорости движения на пропускную способность наиболее заметно при направлении движения ортогональном направлению середины углового сектора пучка лучей  $\gamma = 3^\circ$ . При увеличении скорости величина пропускной способности приближается к величине для направления вектора скорости, близкой к направлению середине углового сектора пучка лучей. В последнем случае величина скорости практически не влияет на пропускную способность ММО системы.

На рис. 4 показано, как изменяется пропускная способность канала связи в зависимости от направления движения передающей антенны при фиксированном значении энергетического потенциала системы и скорости движения равной  $V = 20$  м/с. Эффективность передачи информации неравномерна при различном направлении движения передатчика.

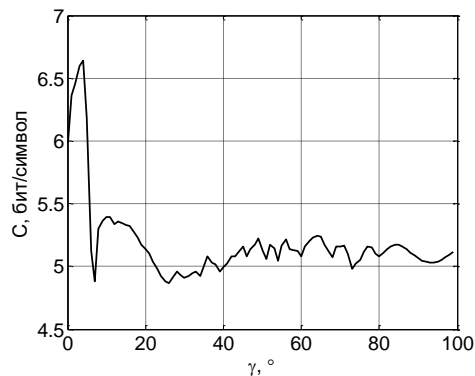


Рис. 4. Зависимость пропускной способности от направления движения передатчика

При изменении направления движения передатчика пропускная способность изменяется немонотонно в пределах 10...12%. Наибольшее значение пропускной способности наблюдается при совпадении направления движения с направлением максимальной концентрации лучей (рис. 2). Эти колебания обусловлены чередованием конструктивной и деструктивной интерференции приходящих сигналов. Доплеровский эффект изменяется в зависимости от угла движения относительно приёмника, а неоднородная структура среды усиливает данные

колебания. Осцилляционный характер кривой на рис. 4 отражает сложное взаимодействие динамики доплеровских сдвигов, многолучевого распространения и пространственной неоднородности среды. Доплеровский эффект вносит регулярные частотные изменения, связанные со скоростью движения передающей антенны, а сама среда, обладающая неоднородной структурой, усиливает эти колебания за счёт непостоянного распределения отражённых и рассеянных сигналов. В совокупности это приводит к тому, что пропускная способность канала не изменяется монотонно, а демонстрирует выраженные пульсации, что имеет важное значение при проектировании систем беспроводной связи в условиях подвижных источников.

На рис. 5 приведена реализация во времени действительной части одного из канальных коэффициентов, отражающая его непериодическое и нерегулярное поведение. Зависимость была получена при  $V = 40$  м/с, частоте сигнала 3 кГц, координатах передающей антенны  $x_{TX} = y_{TX} = 0$ , координатах приемной антенны  $x_{RX} = 10\lambda$ ,  $y_{RX} = 0,5\lambda$  и различных угловых направлениях вектора скорости движения передатчика.

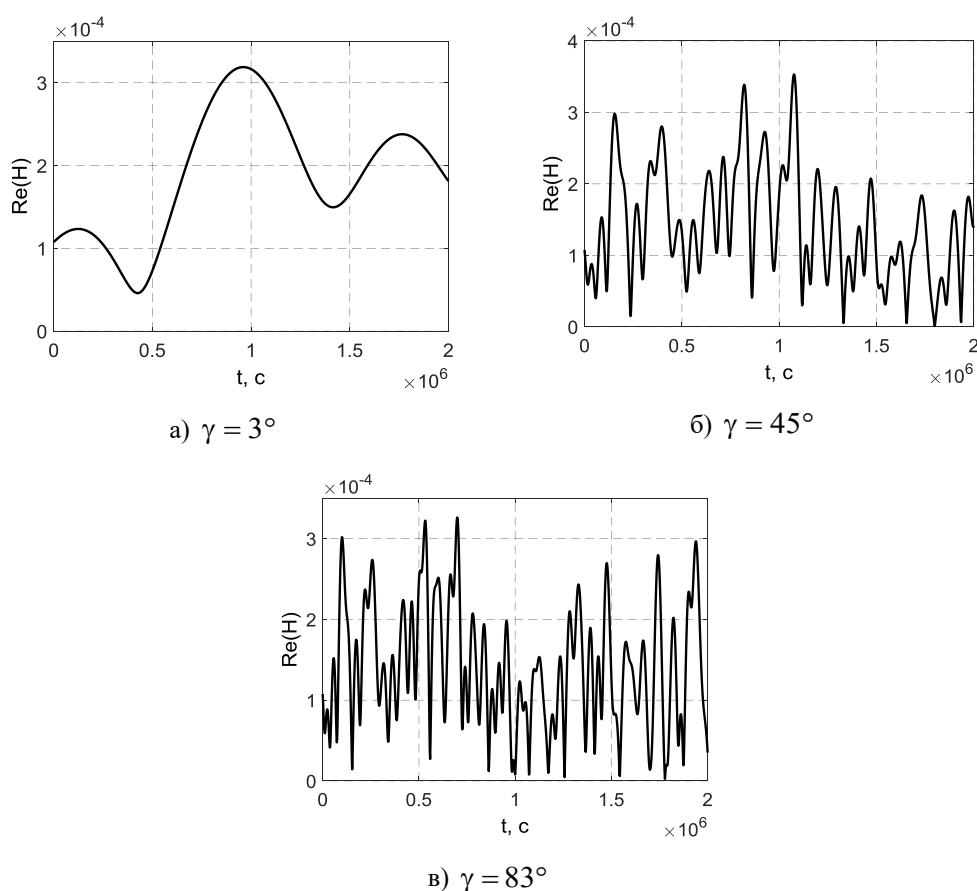


Рис. 5. Зависимость действительной части канального коэффициента от времени

Как следует из графиков рис. 5 частота флуктуаций канального коэффициента во многом определяется угловой координатой центра пучка лучей, попадающих на апертуру приемной антенны. При совпадении направления вектора скорости передатчика с направлением центра пучка лучей скорость флуктуаций наибольшая (рис. 5,в), а при ортогональной ориентации – наименьшая (рис. 5,а). Таким образом, установлено, что спектр зависит от параметров неоднородной среды, в чем принципиально отличается от спектра Джейкса [15].

Полученные зависимости канального коэффициента во времени подтверждают предположение, что канал является нестационарным и стохастическим, что важно учитывать при моделировании и разработке адаптивных методов обработки сигналов в системах беспроводной связи.

**Заключение.** Проведенный анализ канальных коэффициентов в мобильной MIMO системе передачи информации показал влияние скорости движения источника и приемника электромагнитной волны на спектр флюктуаций канальных коэффициентов и пропускную способность MIMO системы. Увеличение скорости движения приводит к расширению спектра флюктуаций канальных коэффициентов, что объясняется неоднородностью среды распространения. Соответственно пропускная способность также немонотонно зависит от скорости движения. Установлено, что влияние скорости в значительной мере зависит от взаимного расположения источника и приемника электромагнитной волны, а также от направления скоростей их взаимного движения. Новизна результатов работы заключается в том, что установлено критическое влияние взаимной ориентации и направления движения приемной и передающей антенн на эффективность передачи данных. Помимо обоснованного возрастания роли среды распространения, разработанная модель неоднородной сплошной среды позволяет провести более детальный учёт физического характера среды и механизма передачи, что важно при проектировании MIMO систем передачи информации нового поколения.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 24-29-00850, <https://rscf.ru/en/project/24-29-00850/> в Рязанском государственном радиотехническом университете им. В.Ф. Уткина.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kuhn V.* Wireless Communications over MIMO Channels. Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2006. – 402 p.
2. *Alcocer Ochoa A., Parra Michel R., Kontorovitch V.Ya.* Geometrical Modeling of Wideband MIMO Channels // *Computación y Sistemas.* – 2006. – Vol. 9, No. 4. – P. 332-344.
3. *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. – Art. ID 19070. – 19 p. – DOI: 10.1155/2007/19070.
4. *Parshin Yu., Grachev M.* Modeling of the MIMO Communication System's Channel Matrix in Inhomogeneous Continuums // *Proceedings of the 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA).* – Moscow, Russian Federation, 2024. – P. 1-4.
5. *Parshin Yu., Grachev M.* Communication System's Channel Capacity in Inhomogeneous Continuums with a Given Spatial Structure // *Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO).* – Budva, Montenegro, 2024. – P. 1-5.
6. *Parshin A., Parshin Yu.* Investigation of Efficient Receiving of Ultra Low Power Signal for IoT Application // *Proceedings of the 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO).* – Budva, Montenegro, 2019. – P. 32-35.
7. *Parshin A., Parshin Yu.* Adaptive Filtering of Non-Gaussian Flicker Noise // *Proceedings of the 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO).* – Budva, Montenegro, 2020. – P. 529-533.
8. *Yuan S.S.A., He Z., Sun S., Chen X., Huang C., Sha W.E.I.* Electromagnetic Effective-Degree-of-Freedom Limit of a MIMO System in 2-D Inhomogeneous Environment // *Electronics.* – 2022. – Vol. 11, No. 19. – P. 3232. – DOI: 10.3390/electronics11193232.
9. *Eden A.* The Search for Christian Doppler. – Wien: Springer-Verlag, 1992. – 136 с. – DOI: 10.1007/978-3-7091-6677-2.
10. *Weichman P.B.* Doppler Effects in Heterogeneous Media with Applications to Ocean Acoustic Modeling // *Physical Review E.* – 2005. – Vol. 72, No. 6. – Art. 066602. – DOI: 10.1103/PhysRevE.72.066602.
11. *Krylovich V.I.* Nonstationary Doppler effect for waves propagating in nonhomogeneous media // *Journal of Engineering Physics.* – 1982. – Vol. 43, No. 4. – P. 1120-1125. – DOI: 10.1007/BF00827778.
12. *Glushchenko A., Glushchenko E.* The Doppler Effect in Non-Reciprocal Media // *European Research.* – 2017. – No. 33. – DOI: 10.20861/2410-2873-2017-33-003.
13. *Gerlach C., Kromer A.* Wave Propagation in Variable Media // *Journal of Acoustic and Electromagnetic Studies.* – 2018. – Vol. 41, No. 2. – P. 105-119.

14. Schaefer R., Thompson L., Berg J. Applications of Doppler Shift in Irregular Media // *Applied Physics Reports*. – 2021. – Vol. 54, No. 7. – P. 367-381.
15. Jakes W.C. (ed.). *Microwave Mobile Communications*. – New York: Wiley-Interscience, 1974. – 642 p.
16. Clarke R.H. A Statistical Theory of Mobile Radio Reception // *Bell System Technical Journal*. – 1968. – Vol. 47, No. 6. – P. 957-1000.
17. Семенов Д.И., Афанасьев С.А., Санников Д.Г. Основы теории распространения электромагнитных волн: учеб. пособие. – Ульяновск: УлГУ, 2012. – 112 с.
18. Гавриленко В.Г., Яшинов В.А. Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме: учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 101 с.
19. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1989. – 560 с.
20. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. – М.: Советское радио, 1971. – 448 с.

#### REFERENCES

1. Kuhn V. *Wireless Communications over MIMO Channels. Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2006, 402 p.
2. Alcocer Ochoa A., Parra Michel R., Kontorovitch V.Ya. Geometrical Modeling of Wideband MIMO Channels, *Computación y Sistemas*, 2006, Vol. 9, No. 4, pp. 332-344.
3. 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, Art. ID 19070, 19 p. DOI: 10.1155/2007/19070.
4. Parshin Yu., Grachev M. Modeling of the MIMO Communication System's Channel Matrix in Inhomogeneous Continuums, *Proceedings of the 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*. Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-4.
5. Parshin Yu., Grachev M. Communication System's Channel Capacity in Inhomogeneous Continuums with a Given Spatial Structure, *Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. Budva, Montenegro, 2024, pp. 1-5.
6. Parshin A., Parshin Yu. Investigation of Efficient Receiving of Ultra Low Power Signal for IoT Application, *Proceedings of the 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. Budva, Montenegro, 2019, pp. 32-35.
7. Parshin A., Parshin Yu. Adaptive Filtering of Non-Gaussian Flicker Noise, *Proceedings of the 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. Budva, Montenegro, 2020, pp. 529-533.
8. Yuan S.S.A., He Z., Sun S., Chen X., Huang C., Sha W.E.I. Electromagnetic Effective-Degree-of-Freedom Limit of a MIMO System in 2-D Inhomogeneous Environment, *Electronics*, 2022, Vol. 11, No. 19, pp. 3232. DOI: 10.3390/electronics11193232.
9. Eden A. *The Search for Christian Doppler*. Wien: Springer-Verlag, 1992, 136 c. DOI: 10.1007/978-3-7091-6677-2.
10. Weichman P.B. Doppler Effects in Heterogeneous Media with Applications to Ocean Acoustic Modeling, *Physical Review E*, 2005, Vol. 72, No. 6, Art. 066602. DOI: 10.1103/PhysRevE.72.066602.
11. Krylovich V.I. Nonstationary Doppler effect for waves propagating in nonhomogeneous media, *Journal of Engineering Physics*, 1982, Vol. 43, No. 4, pp. 1120-1125. DOI: 10.1007/BF00827778.
12. Glushchenko A., Glushchenko E. The Doppler Effect in Non-Reciprocal Media, *European Research*, 2017, No. 33. DOI: 10.20861/2410-2873-2017-33-003.
13. Gerlach C., Kromer A. Wave Propagation in Variable Media, *Journal of Acoustic and Electromagnetic Studies*, 2018, Vol. 41, No. 2, pp. 105-119.
14. Schaefer R., Thompson L., Berg J. Applications of Doppler Shift in Irregular Media, *Applied Physics Reports*, 2021, Vol. 54, No. 7, pp. 367-381.
15. Jakes W.C. (ed.). *Microwave Mobile Communications*. New York: Wiley-Interscience, 1974, 642 p.
16. Clarke R.H. A Statistical Theory of Mobile Radio Reception, *Bell System Technical Journal*, 1968, Vol. 47, No. 6, pp. 957-1000.
17. Sementsov D.I., Afanas'ev S.A., Sannikov D.G. *Osnovy teorii rasprostraneniya elektromagnitnykh voln: ucheb. posobie* [Fundamentals of electromagnetic wave propagation: textbook]. Ul'yanovsk: UIGU, 2012, 112 p.
18. Gavrilenko V.G., Yashnov V.A. *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln v neodnorodnoy plazme: ucheb. posobie* [Electromagnetic wave propagation in inhomogeneous plasma: textbook]. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2015, 101 p.
19. Nikol'skiy V.V., Nikol'skaya T.I. *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* [Electrodynamics and radio wave propagation]. Moscow: Nauka, 1989, 560 p.
20. Gol'dshteyn L.D., Zernov N.V. *Elektromagnitnye polya i volny* [Electromagnetic fields and waves]. Moscow: Sovetskoe radio, 1971, 448 p.

**Грачев Максим Викторович** – Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина; e-mail: grachev.m.v@rsreu.ru; г. Рязань, Россия; тел.: +79966162890; доцент; SPIN-код 2986-9109.

**Паршин Юрий Николаевич** – Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина; e-mail: parshin.y.n@rsreu.ru; г. Рязань, Россия; тел.: +79105037576; зав. кафедрой; SPIN-код 9185-4280.

**Grachev Maxim Victorovich** – Ryazan State Radio Engineering University; e-mail: grachev.m.v@rsreu.ru; Ryazan, Russia; phone: +79966162890; associate professor; SPIN-code 2986-9109.

**Parshin Yury Nikolaevich** – Ryazan State Radio Engineering University; e-mail: parshin.y.n@rsreu.ru; Ryazan, Russia; phone: +79105037576; head of department; SPIN-code 9185-4280.

УДК 004.658

DOI 10.18522/2311-3103-2026-1-96-112

**Д.Ю. Зорькин, А.А. Богнюков, Т.Е. Кожанова**

### **РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ ЗАВОДА «АВТОВАЗ»**

*В условиях глобальной цифровизации промышленности разработка и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) приобретает стратегическое значение для повышения операционной эффективности и конкурентоспособности предприятий. В представленном исследовании рассмотрен кейс интеграции ERP-системы «1С: Управление предприятием» на заводе «АвтоВАЗ» – ключевом игроке российской автомобильной промышленности. Цель работы заключается в разработке и внедрении корпоративной информационной системы (КИС) на базе платформы «1С: ERP», направленной на оптимизацию корпоративной информационной системы (КИС). Методологическая база исследования объединила аналитический, графический и сравнительный подходы, а также практическую апробацию решений в программной среде «1С». Основное внимание уделено проектированию алгоритмов управления производственными циклами, формированию ресурсных спецификаций и настройке сценариев планирования. В рамках исследования разработаны модели прогнозирования спроса, проведён анализ производственных мощностей и выполнена балансировка выпуска с учётом приоритетности моделей (Lada Granta, Vesta, Largus). Реализация системы позволила сократить время обработки заказов на 30%, минимизировать простои складов на 18–22% за счёт синхронизации логистических графиков, а также повысить точность контроля качества через интеграцию диагностических инструментов (CAN-bus, спектрофотометрия). Особый акцент сделан на преодолении институциональных и технологических барьеров, включая модернизацию устаревших методов планирования, обучение сотрудников работе с ERP-интерфейсами и внедрение гибридных облачных решений для обеспечения масштабируемости системы. Практическая значимость исследования подтверждена достижением прозрачности распределения ресурсов, снижением операционных издержек и формированием адаптивной производственной стратегии, ориентированной на динамику рынка. Результаты работы демонстрируют, что внедрение КИС не только оптимизирует текущие бизнес-процессы, но и создаёт основу для устойчивого развития предприятия в условиях цифровой трансформации. Полученный опыт может быть экстраполирован на другие машиностроительные и промышленные предприятия, сталкивающиеся с задачами автоматизации управления и интеграции данных в условиях высокой конкуренции. Перспективы дальнейших исследований связаны с анализом долгосрочных эффектов от внедрения ERP-систем, включая их влияние на инновационный потенциал и экосистему цепочки поставок.*

*Корпоративные информационные системы; ERP-системы; производственное планирование; цифровая трансформация; ресурсное управление; автомобильная промышленность; оптимизация бизнес-процессов; «1С:ERP»; «АвтоВАЗ».*