

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2023.7.3.006

УДК 550.370

Применение аппроксимации спектров для моделирования динамических свойств беспроводных каналов связи

Д. И. Суржик^{1,2}✉, Г. С. Васильев², О. Р. Кузичкин²,
А. В. Коськин³, В. И. Федоров²

¹Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Россия, 602264, Владимирская область, г. Муром, ул. Орловская, д. 23

²Белгородский государственный университет (Белгородский национальный исследовательский университет, НИУ «БелГУ»), Россия, 308015 г. Белгород, ул. Победы, 85

³Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Россия, 302026 г. Орел, ул. Комсомольская д. 95

✉ arzerum@mail.ru

Аннотация

Данная работа посвящена применению методов аппроксимации для моделирования беспроводных радиоканалов связи. Показана актуальность и перспективность применения беспилотных летательных аппаратов в составе летающих самоорганизующихся сетей для передачи высокоскоростной информации в условиях «умных городов». Отмечена также и проблема использования данных сетей, связанная с технической сложностью обеспечения приемлемой надежности и качества беспроводной связи, связанная с многолучевостью распространения сигналов и рядом других факторов. Показано, что в данном аспекте особую актуальность представляет развитие методов математического моделирования для анализа сигналов на входах радиоприемников БПЛА для оценки их амплитудно-фазовых преобразований каналом связи. Установлено, что связь между сигналами на передающей и приемной стороне произвольного беспроводного радиоканала связи в предположении о его линейности может однозначно определяться комплексной передаточной функцией в частотной области, которая на практике является весьма сложной и плохо поддается аналитическому описанию. В связи с этим предложен подход к ее аппроксимации эквивалентной моделью, описываемой дробно-рациональными функциями комплексного переменного, физически реализуемыми смешанными соедине-

ниями различных линейных инерционных и безынерционных звеньев, а для моделирования динамических характеристик — методика численно-аналитического моделирования на основе спектрального метода и кусочно-линейной аппроксимации. Показаны результаты применения предложенных решений.

Ключевые слова

Беспилотные летательные аппараты, «умные города», самоорганизующиеся сети, канал связи, аппроксимация, непрерывные кусочно-линейные функции, нечеткая логика, нейронная сеть

Для цитирования

Суржик Д. И., Васильев Г. С., Кузичкин О. Р., Коськин А. В., Федоров В. И. Применение аппроксимации спектров для моделирования динамических свойств беспроводных каналов связи. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(3):318–333. DOI: 10.15826/urej.2023.7.3.006

Application of spectral approximation to model the dynamic properties of wireless communication channels

Surzhik D. I.^{1,2}✉, Vasilyev G. S.²,
Kuzichkin O. R.², Koskin A. V.³, Fedorov V. I.²

¹Murom Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs» (MI VISU), 23, Orlovskaya Str., Vladimir region, Murom, 602264, Russia

²Belgorod State University (Belgorod National Research University, National Research University «BelSU»), 85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russia

³Oryol State University named after I. S. Turgenev, OSU named after I. S. Turgenev, 95, Komsomolskaya Str., Oryol, 302026, Russia

✉ arzerum@mail.ru

Abstract

This work is devoted to the application of approximation methods for modeling wireless radio communication channels. The rationale and prospects of the use of unmanned aerial vehicles as part of flying self-organizing networks for the transmission of high-speed information in the conditions of «smart cities» are demonstrated. The problem of using these networks is also referred, associated with the technical complexity of ensuring acceptable reliability and quality of wireless communication, associated with the multipath of signal propagation and a number of other factors. It is shown that in this aspect, the development of mathematical modeling methods of

analyzing signals at the inputs of UAV radio receivers in order to evaluate their amplitude-phase transformations by a communication channel is of special significance. It has been established that the connection between the signals on the transmitting and receiving sides of an arbitrary wireless radio communication channel, assuming its linearity, can be uniquely determined by a complex transfer function in the frequency domain, which in practice is very complex and difficult to describe analytically. In this regard, an approach to its approximation by an equivalent model, described by fractional-rational functions of a complex variable, physically realized by mixed connections of various linear inertial and inertial links, is proposed, and for modeling dynamic characteristics, a numerical-analytical modeling technique based on the spectral method and piecewise linear approximation. A results of applying the proposed solutions are shown.

Keywords

Unmanned aerial vehicles, «smart cities», self-organizing networks, communication channel, approximation, continuous piecewise linear functions, fuzzy logic, neural network

For citation

Surzhik D. I., Vasilyev G. S., Kuzichkin O. R., Koskin A. V., Fedorov V. I. Application of spectral approximation to model the dynamic properties of wireless communication channels. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(3):318–333. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2023.7.3.006

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [1] активно используются для решения широкого круга задач различного назначения [2–5]. При этом в последние годы особую популярность набирает их применение в условиях развивающихся быстрыми темпами «умных городов» [6–11] в составе летающих самоорганизующихся сетей FANET (Flying Ad-Hoc Network) [12–15]. Данные сети характеризуются возможностью масштабируемости, быстрого восстановления и обеспечения оптимального покрытия обслуживаемой территории и состоят из двух сегментов: наземного, представленного одним или несколькими наземными комплексами управления (НКУ), и воздушного, представленного сетевыми узлами на базе мало-размерных БПЛА.

Одной из технических проблем, связанных с их использованием самоорганизующихся сетей на базе БПЛА в условиях «умных городов», является обеспечение приемлемой надежности и качества беспроводной связи [16–18]. Данная проблема обусловлена густой застройкой «умных городов», а также наличием зданий

различной геометрии и этажности, влияющих на характер распространения радиосигналов по каналам связи как между отдельными БПЛА, так и между БПЛА и НКУ.

Сложность оценивания и моделирования характеристик беспроводных каналов связи в условиях «умных городов» и распространения радиосигналов по ним во многом определяется отсутствием простых аналитических моделей для их описания, а также многолучевостью распространения сигналов, разнообразием реальных условий распространения радиоволн различных диапазонов, подвижностью мобильных узлов и необходимостью адекватного описания сигнально-помеховой обстановки в точке приема, что определяет актуальность настоящего исследования.

Особенности беспроводных радиоканалов связи для БПЛА в условиях «умных городов»

Беспроводной пространственный радиоканал связи [19–27] представляет собой среду, используемую для передачи сигналов от радиопередатчиков к радиоприемникам, в качестве носителей которых в данном случае могут выступать как БПЛА, так и НКУ.

Идеальным вариантом связи между отдельными БПЛА, а также между БПЛА и НКУ является передача данных в свободном пространстве. В этом случае обычно предполагается, что среда распространения является однородной. Однако в реалиях «умных городов» передача данных в свободном пространстве труднодостижима и на практике традиционно описывается многолучевой моделью распространения радиоволн с учетом явлений переотражения, рассеивания и дифракции. Кроме того, еще одной из особенностей реальных беспроводных радиоканалов связи для БПЛА в условиях «умных городов» является существенный уровень электромагнитных помех.

Следствием указанной совокупности факторов является наличие ряда характерных эффектов при передаче данных с использованием самоорганизующихся сетей на базе БПЛА в условиях «умных городов»: потерь распространения сигналов, замираний их амплитуд и флуктуаций времени прихода на приемные антенны.

Известно множество математических моделей [24, 26, 27], описывающих как радиоканалы мобильной связи, так и сигналы, регистрируемые антенными модулями радиоприемников.

Традиционно различают общие и частные модели радиоканалов связи с многолучевым распространением. При этом выделяют четыре варианта описания замираний в них, которые необходимо учитывать при моделировании реальных каналов связи: частотно-селективные замирания (межсимвольная интерференция), медленные замирания (гауссовское распределение помехи),

быстрые замирания и плоские замирания (закон распределения Рэлея, закон распределения Райса), причем многолучевая модель с медленными замираниями удовлетворительно описывает большинство каналов связи в различных диапазонах волн. Кроме того, под эгидой NASA ведутся регулярные исследования для уточнения данных моделей для случаев распространения радиоволн в различной местности.

Известные методы «слепой» и «полуслепой» обработки сигналов позволяют идентифицировать канал связи по принятым отсчетам смеси сигналов и предполагают внесение в передаваемые последовательности импульсов избыточности (например, циклического сдвига для систем MIMO), достаточной для оценивания его импульсной характеристики. Полезным эффектом использования данной группы методов является временный выигрыш тестирования и идентификации канала связи, однако при этом среднеквадратическая ошибка восстановления сигнала на основе различных алгоритмов существенно зависит от отношения «сигнал — шум». Предложенный в работе метод менее чувствителен к данному влиянию и позволяет снизить его путем накопления выборки анализируемых сигналов.

Характеристики беспроводных радиоканалов связи для БПЛА

Связь между сигналами на передающей и приемной стороне произвольного беспроводного радиоканала связи в предположении о его линейности может однозначно определяться импульсной характеристикой во временной области и комплексной передаточной функцией [24, 27] в частотной, которая может быть записана на основе «классической» модели «вход — выход» при представлении данного канала связи в виде двухполюсника как отношение

$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}, \quad (1)$$

или в показательной форме как

$$H(p) = A(p)e^{j\varphi(p)}, \quad (2)$$

где $X(p)$ — сигнал на передающей стороне канала связи в операторной форме, $Y(p)$ — сигнал на приемной стороне канала связи в операторной форме, $A(p) = |H(p)| = \sqrt{\operatorname{Re}^2[H(p)] + \operatorname{Im}^2[H(p)]}$ — АЧХ канала связи, Re — действительная часть комплексной передаточной функции, Im — мнимая часть комплексной переда-

точной функции, $\varphi(p) = \arg[H(p)] = \arctg \left[\frac{\text{Im}[H(p)]}{\text{Re}[H(p)]} \right]$ — ФЧХ

канала связи.

В соответствии с (2) АЧХ канала связи описывает потери распространения сигналов и амплитудные искажения из-за эффекта замирания, а ФЧХ — задержку распространения сигнала и фазовые искажения вследствие разного времени прихода сигналов на приемные антенны из-за эффекта многолучевости и подвижности мобильных узлов связи. Примеры АЧХ и ФЧХ различных беспроводных радиоканалов связи представлены, например, в [24].

Комплексная передаточная функция (1) реального беспроводного канала связи с учетом амплитудно-фазовых искажений из-за потерь сигналов на трассе и результатов эффекта многолучевости является весьма сложной и плохо поддается аналитическому описанию. В связи с этим актуальным представляется ее аппроксимация эквивалентной моделью, описываемой дробно-рациональными функциями комплексного переменного p , физически реализуемыми смешанными соединениями различных линейных инерционных и безынерционных звеньев. Такой подход позволяет представить произвольный радиоканал связи наглядной эквивалентной функциональной схемой, связывающей входные и выходные величины линейным дифференциальным уравнением конечного порядка. Аналогичное решение было предложено, например, в [24] и использовано авторами работы для описания передаточной функции геоэлектрического разреза.

Аппроксимация спектра отклика канала связи с БПЛА

С использование предложенного подхода к представлению передаточных функций беспроводных каналов связи на основе эквивалентных моделей (и при априорно известных передаваемых сигналах) можно осуществлять моделирование сигналов на входах радиоприемников БПЛА для оценки их амплитудно-фазовых преобразований каналом связи. В этом случае на основе интегральных преобразований, например операторного метода Лапласа, могут быть получены аналитические соотношения для сигналов на приемных сторонах каналов связи. Однако такой подход удобен и применим только для передаточных функций, эквивалентных дифференциальным уравнениям максимум 4-го порядка. Традиционным выходом из данной проблемы может служить применение численных методов решения дифференциальных уравнений, которые, в свою очередь, не позволяют получать аналитических решений, справедливых для изменяемых параметров модели, и требуют существенных вычислительных затрат.

Для преодоления указанных недостатков численных методов может быть применена методика численно-аналитического моделирования на основе спектрального метода, позволяющая выполнить кусочно-линейную аппроксимацию передаваемых сигналов [28–31], передаточной функции канала связи и спектра принимаемого сигнала, а затем получить искомые выражения динамических характеристик, выполнив обратное преобразование Фурье от спектра сигнала на входе радиоприемника БПЛА. Подобная аппроксимация обладает простотой записи и позволяет получать аналитические решения в единообразной форме записи для описания различных моделей системы «радиопередатчик — беспроводной канал связи — радиоприемник».

Рассмотрим данный метод более подробно.

Поскольку канал связи можно считать линейной системой, то преобразование сигналов в нем можно описать выражением

$$Y(j\omega) = X(j\omega) \cdot H(j\omega), \quad (3)$$

где $X(j\omega)$, $Y(j\omega)$ — спектры передаваемого и принимаемого сигналов в канале связи, $H(j\omega)$ — комплексная передаточная функция (1) канала связи.

При сложной форме передаваемого сигнала можно применить аппроксимацию его спектра $X(j\omega)$ переключающими непрерывными кусочно-линейными функциями (НКЛФ)

$$q_i(t) = \frac{A_i}{2\Delta_i} \left(|t - t_i| - |t - t_i + \Delta_i| + \Delta_i \right), \quad (4)$$

что позволяет получить компактное обобщенное выражение спектра на основе прямого преобразования Фурье

$$X(j\omega) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{A_i}{\Delta_i \omega^2} \left[e^{-j\omega(t_i + \Delta_i)} - e^{-j\omega t_i} \right], \quad (5)$$

где i — номер текущего узла аппроксимации, t_i — время в текущем узле аппроксимации, Δ_i — шаг аппроксимации, $A_i = x(t_i + \Delta_i) - x(t_i)$.

Известно, что спектральную плотность принимаемого сигнала $Y(j\omega)$ можно представить суммой действительной и мнимой части, причем для нахождения оригинала $y(t) \leftarrow Y(j\omega)$ достаточно использовать только одну из них. При этом для случаев сложной передаточной функции канала связи или сложной формы передаваемого сигнала удобно использовать аппроксимацию с помощью переключающих НКЛФ по N узлам для вещественного и мнимого спектра принимаемого сигнала

$$y_R(t) = x(t) \cdot H(j\omega_k) + \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^{N-1} a_{0i}^* \omega_i \frac{\sin \omega_i^* t}{\omega_i^* t} \frac{\sin \Delta_i^* t}{\Delta_i^* t} \quad (6)$$

$$y_I(t) = x(t) \cdot H(j\omega_k) + \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^{N-1} b_{0i}^* \omega_i \frac{\cos \omega_i^* \sin \Delta_i^* t}{\omega_i^* \Delta_i^* t}, \quad (7)$$

где $a_{0i}^* = Y_R^*(\omega_i) - Y_R^*(\omega_{i+1})$, $b_{0i}^* = Y_I^*(\omega_i) - Y_I^*(\omega_{i+1})$, — коэффициент i -й переключающей НКЛФ, $\Delta_i^* = \Delta_i/2$, $\omega_i^* = \omega_i + \Delta_i/2$ — центральная частота наклонного бедра i -й переключающей НКЛФ.

Моделирование динамических свойств беспроводных каналов связи с БПЛА

Используя предложенные подходы и полученные математические выражения, описывающие динамические характеристики беспроводных каналов связи, проведено моделирование сигналов на входе радиоприемников БПЛА при типовом воздействии на канал связи в виде единичного скачка. На рис. 1 в качестве примера приведены полученные АЧХ канала связи, а на рис. 2 — динамические характеристики сигналов на входе радиоприемников БПЛА. При этом в данном случае предполагался идеальный случай распространения сигналов в свободном пространстве на основе однолучевой модели, а сам канал связи имитировался аperiодическими звеньями первого-третьих порядков с коэффициентами передачи 10^{-4} (что соответствует имитации ослабления сигнала на трассе в 80 дБ) и одинаковой постоянной времени, равной 10^{-5} с.

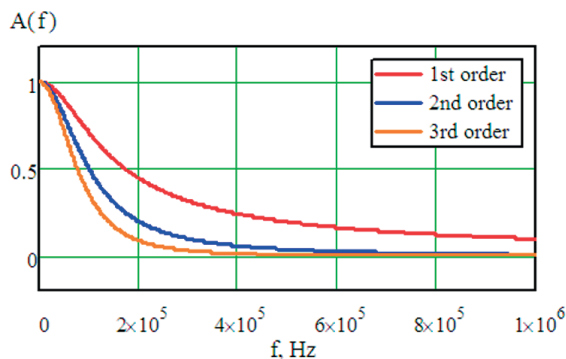


Рис. 1. Пример моделирования АЧХ беспроводного канала связи в предположении об однолучевой модели распространения сигналов

Fig. 1. Example of modeling the frequency response of the wireless communication channel under the assumption of a single-beam model of signal propagation

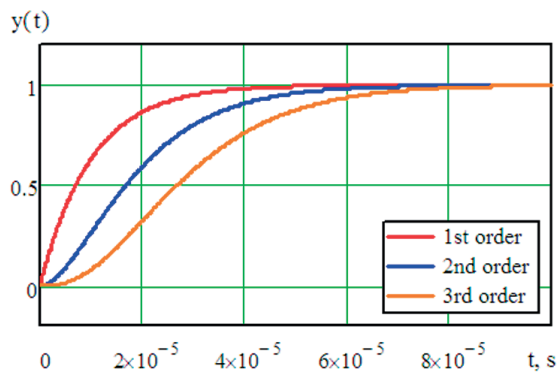


Рис. 2. Динамические характеристики сигналов на входе радиоприемников БПЛА

Fig. 2. Dynamic characteristics of signals at the input of UAV radios

Заклучение

В рамках предложенного подхода набор необходимых исходных данных для моделирования канала связи включает в себя последовательности отсчетов уровня сигнала на передающей и приемной стороне тракта передачи данных, полученные с интервалом дискретизации, большим времени когерентности канала.

Результаты проведенного моделирования хорошо согласуются с данными реальных экспериментальных исследований беспроводных радиоканалов связи и могут быть легко расширены на более сложные случаи распространения сигналов. Таким образом, они могут быть использованы для моделирования характеристик беспроводных радиоканалов связи с БПЛА, а также для оценивания амплитудно-фазовых искажений, вносимых в передаваемые сигналы при их распространении через данные каналы. Полученные таким образом результаты могут быть эффективно использованы впоследствии, например для адаптации физического уровня передачи сетевой модели OSI на основе нейро-нечеткого подхода с целью повышения надежности и качества передачи информации. К таким решениям, в частности, можно отнести применение ММО-технологий, методов адаптивного кодирования и модуляции. Так, например, использование антенных решеток на обоих концах линии связи позволяет уменьшить вероятность битовых ошибок, а применение адаптивного пространственного кодирования и нечеткого выбора методов модуляции — значительно увеличить скорость передачи данных.

Благодарности

Работа поддержана стипендией Президента РФ СП-4829.2021.3 «Повышение качественных показателей современных космических телекоммуникационных систем путем улучшения характеристик их радиопередающей аппаратуры». Теория подготовлена в рамках государственного задания РФ «Исследование и разработка комплексных энергосберегающих и термоэлектрических регенеративных систем» заявка № 2019-1497, № FZWG-2020-0034.

Acknowledgement

The work was supported by the Russian Federation Presidential Scholarship SP-4829.2021.3 “Improving the quality indicators of modern space telecommunication systems by improving the characteristics of their radio transmitting equipment.” The theory was prepared within the framework of the state assignment of the Russian Federation “Research and development of integrated energy-saving and thermoelectric regenerative systems” application No. 2019-1497, No. FZWG-2020-0034.

Список литературы

1. Бондарев А.Н., Киричек Р.В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016;4(4):13–23.
2. Дроздов С.Н., Жиглатый А.А., Кравченко П.П., Скороход С.В., Хусаинов Н.Ш. Об опыте реализации системы видеотрансляции в формате JPEG2000 и перспективах применения стандарта JPEG2000 для передачи видео и мультиспектральных данных с борта БПЛА. *Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Интеллектуальные САПР»*. 2014;7(156):161–170.
3. Хальясмаа А.И., Близинок Д.И., Романов А.М. Диагностический комплекс для оценки состояния воздушных линий электропередачи. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2015;15(4):46–53.
4. Слюсар В. Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2010;(3):80–86.
5. Слюсар В. Радиолинии связи с БПЛА. Примеры реализации. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2010;(5):56–60.
6. Вотцель Д., Кузнецова Е. Технологии умных городов: что влияет на выбор горожан? *McKinsey center for government*. 2018. 66 с. URL: <https://www.mckinsey.com/ru/our-insights/Smart-city-solutions-What-drives-citizen-adoption-around-the-globe> (дата обращения: 22.09.2023).
7. D. McLaren, J. Agyeman. *Sharing Cities. A case for truly smart and sustainable cities*. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts; 2015. 461 с.

8. Абламейко М., Абламейко С. «Умный город»: от теории к практике. *Наука и инновации*. 2018;6(184):28–34.

9. Княгинин В.Н., Кузьмина А.С., Липецкая М.С., Римских Е.А., Рожкова Е.С., Трунова Н.А., и др. *Приоритетные направления внедрения технологий умного города в Российских городах*. Экспертно-аналитический доклад. М: Центр стратегических разработок «Северо-Запад»; 2018. 178 с.

10. Kheir Al-Kodmany. Sentient City: Ubiquitous Computing, Architecture, and the Future of Urban Space. *Journal of Urban Technology*. 2012;19(3):137–144.

11. Курчеева Г.И., Ключков Г.А. Разработка процессной модели «умный город». *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2017;9(5):1–8. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/40EVN517.pdf> (дата обращения: 22.09.2023).

12. Леонов А.В., Чаплышкин В.А. Сети FANET. *Омский научный вестник*. 2015;3(143):297–301.

13. Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey. *Ad Hoc Networks*. 2013;11(3):1254–1270.

14. Ананьев А.В., Стафеев М.А., Макеев Е.В. Разработка способа организации связи с использованием беспилотных летательных аппаратов малой дальности. *Труды МАИ*. 2019;(105):1–18.

15. Чертова О.Г., Чиров Д.С. Построение опорной сети связи на базе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с отсутствием наземной инфраструктуры. *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2019;11(3):60–71.

16. Польшинкин А.В., Ле Х.Т. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2013. Вып. 7. Ч. 2. С. 98–107.

17. Фокин Г.А. Обзор моделей радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами. *Труды учебных заведений связи*. 2018;4(4):85–101.

18. Куликов Г.В., Тамбовский С.С. Оценка качества связи с БПЛА в условиях городской застройки. *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2015;1(6):205–217. URL: <https://rtj.mirea.ru/eng/archive/2015-year/po-1-6-march/> (дата обращения: 22.09.2023).

19. Голиков А.М. *Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика*. СПб.: Лань; 2018. 452 с.

20. Кириллов В.И. *Многоканальные системы передачи данных*. М.: Новое знание; 2002. 751 с.

21. Ирвин Дж., Харль Д. *Передача данных в сетях: инженерный подход*. Пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург; 2003. 448 с.

22. Бабков В.Ю., Вознюк М. А., Никитин А. Н., Сиверс М. А. *Системы связи с кодовым разделением каналов*. СПб: СПбГУТ; 1999. 120 с.
23. Шварцман В.О., Емельянов Г. А. *Теория передачи дискретной информации*. М.: Связь; 1979. 424 с.
24. Крухмалев В.В., Гордиенко В. Н., Моченов А. Д., Бурдин В. А., Крыжановский А. В., и др. *Основы построения телекоммуникационных систем и сетей*. Под ред. В. Н. Гордиенко и В. В. Крухмалева. М.: Горячая линия — Телеком; 2004. 510 с.
25. Ипатов В.П., Орлов В. К., Самойлов И. М., Смирнов В. Н. *Системы мобильной связи*. Под ред. В. П. Ипатова. М.: Горячая линия — Телеком; 2003. 272 с.
26. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. Изд. 2-е, испр. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс»; 2003. 1104 с.
27. Васин В.А., Калмыков В. В., Себекин Ю. Н., Сенин А. И., Федотов И. Б. *Радиосистемы передачи информации*. Под ред. И. Б. Федотова и В. В. Калмыкова. М.: Горячая линия — Телеком; 2005. 472 с.
28. Курилов И.А., Ромашов В. В., Жиганова Е. А., Романов Д. Н., Васильев Г. С., Харчук С. М., и др. Методы анализа радиоустройств на основе функциональной аппроксимации. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2014;(1):35–49.
29. Vasilyev G.S., Kurilov I. A., Kharchuk S. M., Surzhik D. I. Analysis of dynamic characteristics of the nonlinear amplitude-phase converter at complex input influence. *Proceedings of the 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. September 12–13, 2013. Krasnoyarsk, Russia. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693641
30. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Kharchuk S. M., Surzhik D. I. Research of static characteristics of converters of signals with a nonlinear control device. *Proceedings of the 2011 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. September 15–16, 2011. Krasnoyarsk, Russia. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2011. Pp. 93–96.
31. Курилов И.А., Васильев Г. С., Харчук С. М. Анализ динамических характеристик преобразователей сигналов на основе непрерывных кусочно-линейных функций. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2010;(1):100–104.

References

1. Bondarev A.N., Kirichek R. V. Overview of unmanned aerial apparatus for general use and regulation of air UAV movement in different countries. *Telecom IT*. 2016;4(4):13–23. (In Russ.)
2. Drozdov S.N., Zhiglaty A. A., Kravchenko P. P., Skorokhod S. V., Khusainov N. Sh. On the experience of JPEG2000 broadcasting system implementation and about perspectives of JPEG2000 standard using

for transmission of video and multispectral data from UAV. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2014;7(156):161–170. (In Russ.)

3. Khalyasmaa A.I., Bliznyuk D.I., Romanov A.M. Diagnostic system for overhead lines state assessment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2015;15(4):46–53. (In Russ.)

4. Slusar V. Unmanned aircraft data transmission: NATO standards. *Electronics: science, technology, business*. 2010;(3):80–86. (In Russ.)

5. Slusar V. Wireless Links with UAV. Realization Examples. *Electronics: science, technology, business*. 2010;(5):56–60. (In Russ.)

6. Vottsel' D., Kuznetsova E. Tekhnologii umnykh gorodov: chto vliyaet na vybor gorozhan? [Smart city technologies: what affects the choice of citizens?] *McKinsey center for government*. 2018. 66 p. URL: <https://www.mckinsey.com/ru/our-insights/Smart-city-solutions-What-drives-citizen-adoption-around-the-globe> (accessed 22.09.2023). (In Russ.)

7. D. McLaren, J. Agyeman. Sharing Cities. *A case for truly smart and sustainable cities*. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts; 2015. 461 p.

8. Ablameyko M., Ablameyko S. “Smart City”: from theory to practice. *Nauka i innovacii [Science and Innovations]*. 2018;6(184):28–34. (In Russ.)

9. Knyaginina V.N., Kuz'mina A.S., Lipetskaya M.S., Rimskikh E.A., Rozhkova E.S., Trunova N.A., et al. *Prioritetnye napravleniya vnedreniya tekhnologii umnogo goroda v Rossiiskikh gorodakh [Priority directions for the implementation of smart city technologies in Russian cities]*. Expert and analytical report. Moscow: Tsentr strategicheskikh razrabotok «Severo-Zapad»; 2018. 178 p.

10. Kheir Al-Kodmany. Sentient City: Ubiquitous Computing, Architecture, and the Future of Urban Space. *Journal of Urban Technology*. 2012;19(3):137–144.

11. Kurcheeva G.I., Klochkov G.A. Development of a process model «smart city». *Naukovedenie*. 2017;9(5):1–8. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/40EVN517.pdf> (accessed 22.09.2023). (In Russ.)

12. Leonov A.V., Chaplyshkin V.A. Flying Ad Hoc Networks (FANETs). *Omsk Scientific Bulletin*. 2015;3(143):297–301. (In Russ.)

13. Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel S. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey. *Ad Hoc Networks*. 2013;11(3):1254–1270.

14. Anan'ev A.V., Stafeev M.A., Makeev E.V. Developing communication organization method employing short-range unmanned flying vehicles. *Trudy MAI*. 2019;(105):1–18. (In Russ.)

15. Chertova O.G., Chirov D.S. Building a core communication network which is based on small size unmanned aircraft vehicle without ground infrastructure. *H&ES Research*. 2019;11(3):60–71. (In Russ.)

16. Polynkin A.V., Le H.T. Analysis of characteristics of UAV communication link. *Izvestiya Tula State University. Technical science*. 2013. Issue. 7. Part 2. Pp. 98–107. (In Russ.)

17. Fokin G. Survey of Radio Communication Channel Models for Unmanned Aerial Vehicles. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2018;4(4):85–101. (In Russ.)

18. Kulikov G.V., Tambovsky S.S. Assessment of the quality of communication with the UAV inurban terrain. *Herald of MSTU MIREA*. 2015;1(6):205–217. URL: <https://rtj.mirea.ru/eng/archive/2015-year/no-1-6-march/> (accessed 22.09.2023). (In Russ.)

19. Golikov A. M. *Modulyatsiya, kodirovanie i modelirovanie v telekommunikatsionnykh sistemakh. Teoriya i praktika* [Modulation, coding and modeling in telecommunication systems. Theory and practice]. St. Petersburg: Lan', 2018. 452 p. (In Russ.)

20. Kirillov V. I. *Mnogokanal'nye sistemy peredachi dannykh* [Multichannel data transmission systems]. Moscow: Novoe znanie; 2002. 751 p. (In Russ.)

21. Irvin Dzh., Kharl' D. *Data transmission in networks: an engineering approach*. Transl. from English. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2003. 448 p. (In Russ.)

22. Babkov V.Yu., Voznyuk M. A., Nikitin A. N., Sivers M. A. *Sistemy svyazi s kodovym razdeleniem kanalov* [Code Division Communication Systems]. St. Petersburg: SPbGUT, 1999. 120 p. (In Russ.)

23. Shvartsman V.O., Emel'yanov G. A. *Teoriya peredachi diskretnoi informatsii* [The theory of discrete information transmission]. Moscow: Svyaz'; 1979. 424 p. (In Russ.)

24. Krukhmalev V.V., Gordienko V.N., Mochenov A. D., Burdin V. A., Kryzhanovskii A. V., et al. Gordienko V. N. and Krukhmalev V. V. (eds.) *Osnovy postroeniya telekommunikatsionnykh sistem i setei*. [Fundamentals of building telecommunication systems and networks]. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom, 2004. 510 p. (In Russ.)

25. Ipatov V.P., Orlov V. K., Samoilov I. M., Smirnov V. N.; edited by Ipatov V. P. *Sistemy mobil'noi svyazi* [Mobile communication systems]. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom; 2003. 272 p. (In Russ.)

26. Sklyar B. *Digital communication. Fundamentals and applications*. Ed. 2nd, rev. Trans. from English. Moscow: Williams Publishing House, 2003. 1104 p. (In Russ.)

27. Vasin V.A., Kalmykov V. V., Sebekin Yu.N., Senin A. I., Fedotov I. B.; edited by Fedotov I. B. and Kalmykova V. V. *Radiosistemy peredachi informatsii* [Radio information transmission systems]. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom; 2005. 472 p. (In Russ.)

28. Kurilov I.A., Romashov V. V., Zhiganova E. A., Romanov D. N., Vasiliev G.S., Kharchuk S. M., et al. Methods of Radio Devices Analysis on the Basis of Functional Approximation. *Radio engineering and telecommunication systems*. 2014;(1):35–49. (In Russ.)

29. Vasilyev G.S., Kurilov I. A., Kharchuk S. M., Surzhik D. I. Analysis of dynamic characteristics of the nonlinear amplitude-phase converter at

complex input influence. *Proceedings of the 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. September 12–13, 2013. Krasnoyarsk, Russia. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693641

30. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M., Surzhik D.I. Research of static characteristics of converters of signals with a nonlinear control device. *Proceedings of the 2011 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. September 15–16, 2011. Krasnoyarsk, Russia. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2011. Pp. 93–96.

31. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M. Analysis of dynamic characteristics of signal converters based on continuous piecewise linear functions. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2010;(1):100–104. (In Russ.)

Информация об авторах

Суржик Дмитрий Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры управления и контроля в технических системах. Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (МИ ВлГУ), Россия.

Васильев Глеб Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник инженерингового центра. Белгородский государственный университет (Белгородский национальный исследовательский университет, НИУ «БелГУ»), Россия.

Кузичкин Олег Рудольфович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры информационных и робототехнических. Белгородский государственный университет (Белгородский национальный исследовательский университет, НИУ «БелГУ»), Россия.

Коськин Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор, директор департамента информатизации и перспективного развития. Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Россия.

Федоров Вячеслав Игоревич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационных и робототехнических систем. Белгородский государственный университет (Белгородский национальный исследовательский университет, НИУ «БелГУ»), Россия.

Information about the authors

Dmitry I. Surzhik, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Control and Control in Technical Systems. Murom Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs» (MI VISU), Russia.

Gleb S. Vasilyev, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Engineering Center. Belgorod State University (Belgorod National Research University, National Research University «BelSU»), Russia.

Oleg R. Kuzichkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, Department of Information and Robotic Systems. Belgorod State University (Belgorod National Research University, National Research University «BelSU»), Russia.

Alexander V. Koskin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Department of Informatization and Prospective Development. Oryol State University named after I. S. Turgenev, OSU named after I. S. Turgenev, Russia.

Vyacheslav I. Fedorov, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Information and Robotic Systems. Belgorod State University (Belgorod National Research University, Belgorod National Research University), Russia.

Поступила / Received: 04.08.2023

Принята в печать / Accepted: 12.09.2023