

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В СПУТНИКОВЫХ РАДИОСИСТЕМАХ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА И РАДИОНАВИГАЦИИ

А. Н. Дементьев<sup>1</sup>, А. Н. Новиков<sup>1</sup>, К. В. Арсеньев<sup>1</sup>,  
А. Н. Куркин<sup>2</sup>, А. О. Жуков<sup>3,4</sup>, И. Н. Карцан<sup>5,6</sup> ✉

<sup>1</sup> МИРЭА – Российский технологический университет,  
г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Департамент Министерства обороны Российской Федерации,  
г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> Экспертно-аналитический центр, г. Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup> Институт астрономии РАН, г. Москва, Российская Федерация

<sup>5</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва,  
г. Красноярск, Российская Федерация

<sup>6</sup> Морской гидрофизический институт РАН,  
г. Севастополь, Российская Федерация

Для эффективного приема полезного широкополосного сигнала требуется компенсировать искажения, вызванные комплексным частотно-зависимым коэффициентом приема-передающей антенны, мультипликативными помехами и шумами от неоднородности среды распространения, аддитивными помехами и шумами. Применение только корреляционной обработки при определенных условиях не позволит принять полезный широкополосный сигнал с требуемым качеством. В статье разработана математическая модель пространственно-временной обработки широкополосных сигналов в спутниковых системах широкополосного доступа, показывающая, что пространственно-временная обработка должна проводиться в два этапа. На первом этапе проводится пространственно-временная обработка в канале адаптивной антенной решетки на основе формирования комплексного частотно-зависимого вектора весовых коэффициентов, который должен изменяться с изменением сигнально-помеховой обстановки в реальном масштабе времени с учетом изменения направления на источники излучения. На втором этапе производится корреляционная обработка широкополосного сигнала на основе применения кодовых последовательностей большой длины. Данная модель является основой для разработки методов формирования и корреляционной (временной) обработки широкополосных сигналов и методов пространственно-временной обработки широкополосных сигналов в условиях воздействия преднамеренного и непреднамеренного воздействия. На основе представленной математической модели пространственно-временной обработки широкополосных сигналов определены основные направления повышения помехозащищенности в радиоэлектронных системах.

**Ключевые слова:** широкополосный сигнал, спектр сигнала, корреляционная функция, кодовая последовательность, комплексная огибающая, весовой коэффициент.

## Введение

В настоящее время широкополосные спутниковые системы привлекают все больший интерес технических специалистов аэрокосмической

отрасли. Достижения в технологии передачи данных привели к появлению недорогих наземных спутниковых терминалов. Предполагается, что превосходные возможности удаленного доступа спутниковых сетей позволят предоставлять широкополосные услуги географически различным группам пользователей. Доступ к широкополосным услугам через спутники является одним из

✉ kartsan2003@mail.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2023

основных вопросов и зависит не только от типа орбиты спутниковой системы, а, в том числе, и от обработки широкополосных сигналов. Это является мотивацией для обсуждения пространственно-временной обработки широкополосных сигналов, как в спутниковых радиосистемах широкополосного доступа, так и в радионавигации.

### 1. Постановка задачи

Известно, что любой сигнал можно записать в следующем виде [1–4]:

$$u(t) = A(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \theta(t)), \quad (1)$$

где  $A(t)$  – огибающая сигнала,  $\omega_0$  – несущая частота,  $\theta(t)$  – фаза сигнала.

Спектр сигнала (1) определяется преобразованием Фурье [1–6]:

$$c(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (2)$$

Спектр является функцией угловой частоты  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  – линейная частота. Бесконечные пределы интегрирования соответствуют общему случаю. При определении финитного сигнала необходимо учитывать его расположение на оси времени. Спектр сигнала может быть представлен в виде (3):

$$c(\omega) = |c(\omega)| \cdot e^{i\Phi(\omega)}, \quad (3)$$

где  $|c(\omega)|$  – амплитудный спектр сигнала,  $\Phi(\omega)$  – фазовый спектр сигнала.

Сигнал по его спектру находится с помощью обратного преобразования Фурье:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} c(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega. \quad (4)$$

Радиосигнал (1) содержит быстроменяющийся множитель в виде косинусоиды, в аргумент которой входит несущая частота  $\omega_0$ . Соответственно спектр (2) этого сигнала состоит из двухчастотных полос, сосредоточенных около частот  $\omega_0$  и  $-\omega_0$ . При теоретических исследованиях целесообразно для упрощения промежуточных математических операций «освободить» сигнал и его спектр от несущей частоты  $\omega_0$ . Это можно осуществить при введении комплексной огибающей сигнала.

Комплексная огибающая радиосигнала (1) определяется как:

$$U(t) = |U(t)| \cdot e^{i\theta(t)}, \quad (5)$$

где  $|U(t)| = A(t)$  – огибающая сигнала  $u(t)$ .

Переход от комплексной огибающей (5) к сигналу осуществляется с помощью следующей формулы:

$$u(t) = \text{Re}(U(t)) \cdot e^{i\omega_0 t}, \quad (6)$$

где  $\text{Re}(U(t))$  – действительная часть.

Спектр комплексной огибающей имеет вид (7):

$$C(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(t) \cdot e^{-i\omega t} dt. \quad (7)$$

Комплексная огибающая сигнала находится согласно обратному преобразованию Фурье:

$$U(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} C(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega. \quad (8)$$

Спектр комплексной огибающей можно представить в виде:

$$C(\omega) = |C(\omega)| \cdot e^{i\Phi(\omega)}, \quad (9)$$

где  $|c(\omega)|$  – амплитудный спектр,  $\Phi(\omega)$  – фазовый спектр.

Так как в современных радиотехнических системах наибольший интерес представляют фазоманипулированные сигналы (ФМ), представляющие собой последовательность радиоимпульсов, начальная фаза которых изменяется по заданному закону, то целесообразно рассмотреть пространственно-временную обработку данных сигналов в адаптивной антенной решетке.

Комплексная огибающая ФМ сигналов представляет собой последовательность положительных и отрицательных видеоимпульсов. Так как между ФМ сигналом и его комплексной огибающей существует однозначное соответствие, то ее также можно назвать сигналом.

Как правило, ФМ сигнал состоит из набора прямоугольных импульсов  $u_0(t)$ , которые принимают значения 0 и 1, что соответствует начальным фазам 0 и  $\pi$  в радио-ФМ сигнале. При таком определении комплексная огибающая ФМ сигнала записывается следующим образом:

$$U(t) = \sum_{n=1}^N a_n u_0(t - (n-1)\tau_0), \quad (10)$$

где  $a_n$  – амплитуда  $n$ -го импульса ( $n = 1, \dots, N$ ),  $N$  – число прямоугольных импульсов,  $\tau_0$  – длительность одного импульса.

Длительность кодовой последовательности  $A = (a_1 a_2 \dots a_n \dots a_N)$  ФМ сигнала равна:

$$T = N \cdot \tau_0. \quad (11)$$

Спектральные свойства ФМ сигналов определяются спектром импульса  $u_0(t)$  и кодовой последовательностью  $A$ . Спектр импульса  $u_0(t)$  имеет вид [2–4; 7; 8]:

$$I_0(\omega) = \int_0^{\tau_0} u_0(t) \cdot e^{-i\omega t} dt. \quad (12)$$

Спектр комплексной огибающей ФМ сигнала [1–4; 9]:

$$C(\omega) = I_0(\omega) \sum_{n=1}^N a_n \cdot e^{-i(n-1)\omega\tau_0}. \quad (13)$$

Спектр комплексной огибающей ФМ сигнала также можно представить в следующем виде:

$$C(\omega) = I_0(\omega)H(\omega), \quad (14)$$

где  $H(\omega) = \sum_{n=1}^N a_n \cdot e^{-i(n-1)\omega\tau_0}$  – спектр кодовой последовательности.

Таким образом, для качественного приема широкополосного ФМ сигнала необходимо восстановить на приемной стороне два спектра.

## 2. Результаты и обсуждение

При передаче на сигнал накладываются различные искажения, которые могут привести к потере информации. После того, как сигнал был сформирован и прошел все этапы от модуляции до процесса расширения спектра, он поступает на антенну, которая, ввиду своей неидеальности и нелинейности, вносит искажения в виде комплексного частотно-зависимого коэффициента передачи антенны:

$$X(\omega) = I_0(\omega)H(\omega)k_{\text{прд}}(\omega), \quad (15)$$

где  $X(\omega)$  – искаженный полезный широкополосный сигнал,  $k_{\text{прд}}(\omega)$  – комплексный частотно-зависимый коэффициент передачи антенны.

Далее на спектр сигнала накладываются различного рода помехи естественного и искусственного происхождения, такие как шумы, помехи от средств радиоэлектронной борьбы, мультипликативные помехи, вызванные неоднородностью среды распространения и многолучестью и т. д. Таким образом, формула (15) примет вид:

$$X(\omega, t) = I_0(\omega)H(\omega)k_{\text{прд}}(\omega)n_m(\omega, t) + n_a(\omega, t), \quad (16)$$

где  $n_m(\omega, t)$  – спектр мультипликативных помех и шумов, вызванных неоднородностью среды распространения;  $n_a(\omega, t)$  – спектр аддитивных помех и шумов.

Далее сигнал поступает на приемную антенну, которая, как и передающая антенна, также вносит искажения, которые выражаются в виде комплексного частотно-зависимого коэффициента приема антенны. Таким образом, выражение (16) примет вид:

$$X(\omega, t) = \left( I_0(\omega)H(\omega)k_{\text{прд}}(\omega)n_m(\omega, t) + n_a(\omega, t) \right) \cdot k_{\text{прм}}(\omega), \quad (17)$$

где  $k_{\text{прм}}(\omega)$  – комплексный частотно-зависимый коэффициент приема антенны.

Следовательно, для эффективного приема полезного широкополосного сигнала требуется компенсировать все перечисленные факторы, приводящие к искажениям. Как видно из выражения (17), применение только корреляционной обработки при определенных условиях не позволит

принять полезный широкополосный сигнал с требуемым качеством.

Для решения сформулированной задачи необходимо, чтобы коэффициент приема антенны компенсировал коэффициент передачи антенны, то есть:

$$k_{\text{прм}}(\omega) \Leftrightarrow k_{\text{прд}}(\omega). \quad (18)$$

Выполнение условия (18) обеспечивается на этапе проектирования антенн.

Вышеприведенные соотношения справедливы для всенаправленных антенн и подразумевают, что обработка сигнала будет производиться в корреляционном приемнике или согласованном фильтре. Однако данный вид обработки является неэффективным в случае воздействия структур подобных или имитационных помех. В связи с этим возникает необходимость применения направленных антенн, которые позволят усилить полезный сигнал по сравнению с помехой. Тогда выражение (17) примет вид [10–13]:

$$C(\omega) = \left( I_0(\omega)H(\omega)k_{\text{прд}}(\omega)n_m(\omega, t) + n_a(\omega, t) \right) \cdot S_0(\omega, \theta, \varphi, t) \cdot k_{\text{прм}}(\omega), \quad (19)$$

где  $S_0(\omega, \theta, \varphi, t)$  – вектор, характеризующий направление главного максимума диаграммы направленности (ДН) антенны.

Однако в случае, если помеховый сигнал имеет большую мощность или попадает в область главного максимума ДН антенны, применение направленных антенн также не решает задачу приема сигнала с требуемым качеством.

Поэтому для решения возникшей задачи необходимо применение антенных систем с обработкой сигналов. В настоящее время обработку сигналов в антенне возможно проводить только на основе адаптивной антенной решетки (ААР). Так, для решения данной задачи в каналах антенной решетки предлагается ввести комплексный частотно-зависимый вектор весовых коэффициентов, который позволит нейтрализовать возникшие искажения. Таким образом, выражение (19) примет вид [11–16]:

$$C(\omega) = \left( I_0(\omega)H(\omega)k_{\text{прд}}(\omega)n_m(\omega, t) + n_a(\omega, t) \right) \cdot k_{\text{прм}}(\omega) \cdot \bar{W}, \quad (20)$$

где  $\bar{W} = f(\omega, \theta, \varphi, t)$  – комплексный вектор весовых коэффициентов, изменяющийся во времени и обеспечивающий пространственно-временную обработку широкополосного сигнала (ШПС) и подавление аддитивных помех и шумов  $n_a(\omega, t)$ .

Формирование такого вектора является сложной задачей, которая в настоящее время решена только для узкополосных сигналов, так как для ШПС необходимо формировать вектор весовых коэффициентов в широкой полосе частот. Еще одной нерешенной задачей является формирование данного вектора для случая, когда источ-

ники полезного и помеховых сигналов находятся в движении. Также вектор весовых коэффициентов должен защищать главный максимум ДН ААР от воздействия помехового сигнала.

Как уже отмечалось выше, для обеспечения скрытого и помехоустойчивого функционирования широкополосной радиотехнической системы необходимо увеличивать базу сигналов. Это достигается на основе увеличения разрядности кодовой последовательности и дальнейшей обработки сигнала в корреляторе или согласованном фильтре. Однако синтез таких сигналов является сложной и трудоемкой задачей.

После обработки сигналов в каналах ААР необходимо произвести корреляционную обработку принятого ШПС. Данная операция математически должна проводиться с сигналом как функцией времени. С этой целью необходимо принятый сигнал представить во временной форме на основе обратного преобразования Фурье.

Далее находится взаимная корреляционная функция на основе выражения:

$$R_a(m) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i a_{i-m}, \quad (21)$$

где  $A = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n \ \dots \ a_N)$  – кодовая последовательность ФМ сигнала.

Как было сказано выше, для обеспечения высокой структурной скрытности и помехоустойчивости необходимо, чтобы кодовая последовательность обеспечивала низкий уровень боковых лепестков автокорреляционной функции. Решение данной задачи при борьбе со структурно подобными помехами использовать традиционные методы формирования кодовых последовательностей невозможно, так как помеховый сигнал повторяет структуру полезного. Для решения этой задачи требуется разработка нетривиальных подходов к формированию кодовых последовательностей.

## Заключение

Таким образом, приведенная математическая модель позволяет сделать вывод о том, что пространственно-временная обработка должна проводиться в два этапа.

На первом этапе проводится пространственно-временная обработка в канале ААР на основе формирования комплексного частотно-зависи-

мого вектора весовых коэффициентов. При этом данный вектор должен изменяться с изменением сигнально-помеховой обстановки в реальном масштабе времени с учетом изменения направления на источники излучения.

На втором этапе производится корреляционная обработка ШПС на основе применения кодовых последовательностей большой длины. Таким образом, возникает необходимость в разработке новых методов формирования таких последовательностей с высокой структурной скрытностью.

Основным критерием эффективности функционирования узкополосных антенных решеток является максимум отношения сигнал/(помеха+шум) (ОСПШ). Однако для ШПС этого недостаточно. Разработанная математическая модель позволяет сделать вывод о том, что при обработке необходимо также учитывать степень восстановления спектра сигнала и его структурную скрытность и помехоустойчивость. Исходя из изложенного, можно сделать вывод о критериях эффективности функционирования широкополосной ААР. Для обеспечения помехоустойчивости требуется максимизировать ОСПШ в каналах обработки антенной решетки за счет выбора векторов весовых коэффициентов и в корреляторе за счет формирования оптимальных кодовых последовательностей. Также необходимо обеспечить минимальное среднеквадратическое отклонение спектра полезного ШПС от исходного. Это также должно достигаться за счет подстройки вектора весовых коэффициентов в каналах обработки антенной решетки. Для достижения высокой структурной скрытности требуется применение составных кодовых последовательностей неограниченной длины.

В связи с вышесказанным, можно выделить основные направления повышения помехозащищенности радиоэлектронных системах: применение сложных сигналов и ААР, а также их комплексирование.

## Благодарности

Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента России (проект НШ-1357.2022.6 «Модели, методы и средства получения и обработки информации о космических объектах в широком спектральном диапазоне электромагнитных волн»).

## Список литературы

- [1] Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов: принципы и приложения. М. : Техносфера, 2007. 487 с.
- [2] Фатеев Ю. Л., Гладышев А. Б., Ратушняк В. Н., Голубятников М. А. Организация и структура радиотехнической системы ближней навигации на основе псевдоспутников // Сборник «Радионавигационные технологии». Сер. «Радиосвязь и радионавигация». М. 2017. С. 34–37.

- [3] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Veysov E. A., Tyapkin V. N. A hardware-software complex for modelling and research of near navigation based on pseudolites // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. vol. 803. 012048.
- [4] Владимирив В. М., Ратушняк В. Н., Вяхирев В. А., Тяпкин И. В. Особенности сканирования атмосферы и построения радиолокационных станций вертикального зондирования с малоэлементной антенной решеткой // *Космические аппараты и технологии*. 2019. Т. 3. № 4. С. 237–242. doi: 10.26732/2618-7957-2019-4-237-242.
- [5] Жуков А. О., Карцан И. Н. Оценки функциональных характеристик радиотехнической системы // *Сборник материалов II Всерос. науч.-прак. конф. «Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах»*. М. 2022. С. 267–280.
- [6] Карцан И. Н., Охоткин К. Г., Карцан Р. В., Пахоруков Д. Н. Эффективность радионавигационных систем // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева*. 2013. № 3 (49). С. 48–50.
- [7] Жуков А. О., Минин И. В., Валяев И. Н., Бондарева М. К., Карцан И. Н. Применение перспективных радиотехнических средств в интересах контроля космических объектов // *Сборник материалов VI Всерос. науч.-прак. конф. «Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления»*. М. 2021. С. 388–397.
- [8] *Спутниковые системы связи и вещания (справочно-аналитическое издание)*. М. : Радиотехника, 2008. № 1. 384 с.
- [9] Головкин В. В., Есипенко А. А., Кузовников А. В. Система спутниковой связи на низких орбитах для обеспечения высокоскоростной передачи данных // *Научные технологии*. 2016. № 7. С. 19–21.
- [10] Габриэлян Д. Д., Новиков А. Н., Цыпорина И. Г. Оптимальное подавление широкополосных помех в адаптивных антенных решетках // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2011. Т. 16. № 6. С. 20–23.
- [11] Габриэлян Д. Д., Новиков А. Н. Квазиоптимальный метод обработки широкополосных сигналов в условиях радиопомех // *Антенны*. 2011. № 9. С. 26–29.
- [12] Zhukov A. O., Valyaev I. N., Kovalenko V. P., Turlov Z. N., Chebotarev A. S., Kartsan I. N., Shumakova N. A. Adaptation of receiving channels to the spectrum of the received signal // *Proceedings of the JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies*. Krasnoyarsk. 2020. P. 032070.
- [13] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Ratushnyak V. N., Tyapkin V. N. Measuring complex for studying directional characteristics of antennas of satellite earth stations // *Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications*. 2021. P. 9438891.
- [14] Mishurov A. V., Gorchakovskiy A. A., Tyapkin V. N., Panko S. P., Zubov T. A., Dmitriev D. D. Simulation of a multi-frequency satellite communication channel // *Proceedings of the Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies*. 2020. P. 9067372.
- [15] Dmitriev D., Sokolovskiy A., Gladyshev A., Ratushniak V., Tyapkin V. Pseudorandom sequence generator using cordic processor // *Proceedings of the Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology*. 2019. pp. 477–480.
- [16] Sokolovskiy A. V., Veisov E. A., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D. Hardware Architectures of the QR-Decomposition Based on a Givens Rotation Technique // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2019. vol. 12. no. 5. pp. 606–613. doi: 10.17516/1997-1397-2019-12-5-606-613.

## MATHEMATICAL MODEL OF SPATIAL AND TEMPORAL PROCESSING OF BROADBAND SIGNALS IN SATELLITE RADIO SYSTEMS OF BROADBAND ACCESS AND RADIO NAVIGATION

**A. N. Demytyev<sup>1</sup>, A. N. Novikov<sup>1</sup>, K. V. Arsenyev<sup>1</sup>,  
A. N. Kurkin<sup>2</sup>, A. O. Zhukov<sup>3,4</sup>, I. N. Kartsan<sup>5,6</sup>**

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University,  
Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Department of the Ministry of Defense of the Russian Federation,  
Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> Expert and Analytical Center, Moscow, Russian Federation



<sup>4</sup> Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>5</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>6</sup> Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Sevastopol, Russian Federation

To effectively receive a useful broadband signal, it is necessary to compensate for distortions caused by the complex frequency-dependent coefficient of the receiving and transmitting antenna, multiplicative interference and noise from the heterogeneity of the propagation medium, additive interference and noise. Using only correlation processing under certain conditions will not allow receiving a useful broadband signal with the required quality. The article develops a mathematical model of spatio-temporal processing of broadband signals in satellite broadband access systems, showing that spatio-temporal processing should be carried out in two stages. At the first stage, space-time processing is carried out in the channel adaptively to the antenna array based on the formation of a complex frequency-dependent vector of weighting coefficients, which should change with a change in the signal-interference situation in real time, taking into account the change in the direction of radiation sources. At the second stage, correlation processing of the broadband signal is performed based on the use of long-length code sequences. This model is the basis for the development of methods for the formation and correlation (temporal) processing of broadband signals and methods of spatio-temporal processing of broadband signals under conditions of intentional and unintentional exposure. Based on the presented mathematical model of spatio-temporal processing of broadband signals, the main directions of increasing the noise immunity of radio-electronic systems are determined.

**Keywords:** broadband signal, signal spectrum, correlation function, code sequence, complex envelope, weighting factor.

## References

- [1] Ipatov V. P. *Shirokopolosnye sistemy i kodovoe razdelenie signalov: principy i prilozheniya* [Broadband systems and code division of signals: principles and applications]. Moscow, Technosphere, 2007, 487 p. (In Russian)
- [2] Fateev Yu. L., Gladyshev A. B., Ratushnyak V. N., Golubyatnikov M. A. *Organizatsiya i struktura radiotekhnicheskoy sistemy blizhney navigatsii na osnove psevdosputnikov* [Organization and structure of the radio engineering system of short-range navigation based on pseudo-satellites] // Collection «Radio navigation technologies». Series «Radio communication and radio navigation», Moscow, 2017, pp. 34–37. (In Russian)
- [3] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Veysov E. A., Tyapkin V. N. A hardware-software complex for modelling and research of near navigation based on pseudolites // *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803, 012048.
- [4] Vladimirov V. M., Ratushnyak V. N., Vyakhirev V. A., Tyapkin I. V. *Osobennosti skanirovaniya atmosfery i postroyeniya radiolokatsionnykh stantsiy vertikal'nogo zondirovaniya s maloelementnoy antennoy reshetkoj* [Features of atmospheric scanning and construction of vertical sounding radar stations with a low-element antenna array] // *Spacecrafts & Technologies*, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 237–242. doi: 10.26732/2618-7957-2019-4-237-242. (In Russian)
- [5] Zhukov A. O., Kartsan I. N. *Ocenki funktsional'nykh harakteristik radiotekhnicheskoy sistemy* [Evaluation of functional characteristics of a radio engineering system] // Collection of materials of the II All-Russian scientific and practical conference «Technologies for obtaining and processing information about dynamic objects and systems», Moscow, 2022, pp. 267–280. (In Russian)
- [6] Kartsan I. N., Okhotkin K. G., Kartsan R. V., Pakhorukov D. N. *Effektivnost' radionavigatsionnykh sistem* [Efficiency of radio navigation systems] // *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 3 (49), pp. 48–50. (In Russian)
- [7] Zhukov A. O., Minin I. V., Valyaev I. N., Bondareva M. K., Kartsan I. N. *Primenenie perspektivnykh radiotekhnicheskikh sredstv v interesakh kontrolya kosmicheskikh ob"ektov* [Application of promising radio-technical means in the interests of control of space objects] // Collection of materials of the VI All-Russian scientific and practical conference «Issues of control of economic activity and financial audit, national security, system analysis and management», Moscow, 2021, pp. 388–397. (In Russian)
- [8] *Sputnikovyie sistemy svyazi i veshchaniya* [Satellite communication and broadcasting systems]. Moscow, Radio Engineering, 2008, no. 1, 384 p. (In Russian)
- [9] Golovkov V. V., Esipenko A. A., Kuzovnikov A. V. *Sistema sputnikovoy svyazi na nizkikh orbitah dlya obespecheniya vysokoskorostnoy peredachi dannykh* [Satellite communication system in low orbits to ensure high-speed data transmission] // *Journal Science Intensive Technologies*, 2016, no. 7, pp. 19–21. (In Russian)

- [10] Gabrielyan D. D., Novikov A. N., Tsygorina I. G. *Optimal'noe podavlenie shirokopolosnyh pomekh v adaptivnyh antennoy reshetkah* [Optimal suppression of broadband interference in adaptive antenna arrays] // Journal Electromagnetic Waves and Electronic Systems, 2011, vol. 16, no. 6, pp. 20–23. (In Russian)
- [11] Gabrielyan D. D., Novikov A. N. *Kvazi-optimal'nyy metod obrabotki shirokopolosnyh signalov v usloviyah radiopomekh* [A quasi-optimal method for processing broadband signals in radio interference conditions] // Antennas, 2011, no. 9, pp. 26–29. (In Russian)
- [12] Zhukov A. O., Valyaev I. N., Kovalenko V. P., Turlov Z. N., Chebotarev A. S., Kartsan I. N., Shumakova N. A. Adaptation of receiving channels to the spectrum of the received signal // Proceedings of the JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, 2020, P. 032070.
- [13] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Ratushnyak V. N., Tyapkin V. N. Measuring complex for studying directional characteristics of antennas of satellite earth stations // Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications, 2021, P. 9438891.
- [14] Mishurov A. V., Gorchakovskiy A. A., Tyapkin V. N., Panko S. P., Zubov T. A., Dmitriev D. D. Simulation of a multi-frequency satellite communication channel // Proceedings of the Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, 2020, P. 9067372.
- [15] Dmitriev D., Sokolovskiy A., Gladyshev A., Ratushniak V., Tyapkin V. Pseudorandom sequence generator using cordic processor // Proceedings of the Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, 2019, pp. 477–480.
- [16] Sokolovskiy A. V., Veisov E. A., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D. Hardware Architectures of the QR-Decomposition Based on a Givens Rotation Technique // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics, 2019, vol. 12, no. 5, pp. 606–613. doi: 10.17516/1997-1397-2019-12-5-606-613.

## Сведения об авторах

*Арсеньев Константин Владимирович* – специалист научно-исследовательского испытательного центра радиоэлектронных технологий РТУ МИРЭА. Окончил Тульское высшее артиллерийское инженерное училище в 1994 году. Область научных интересов: радиофизика, устройства СВЧ и антенны.

*Дементьев Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА. Окончил Краснодарское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск в 1997 году. Область научных интересов: радиофизика, устройства СВЧ и антенны.

*Жуков Александр Олегович* – доктор технических наук, профессор, заместитель директора ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр» по научной работе. Окончил Московское высшее училище радиоэлектроники ПВО в 2001 году. Область научных интересов: системный анализ, управление, технологии получения и обработки информации, искусственный интеллект, системы контроля космического пространства.

*Карцан Игорь Николаевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры безопасности информационных технологий Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, старший научный сотрудник Морского гидрофизического института РАН. Окончил Красноярское высшее командное училище радиоэлектроники ПВО в 1999 году. Область научных интересов: система управления малыми космическими аппаратами.

ORCID: 0000-0003-1833-4036

*Куркин Михаил Сергеевич* – главный экономист Департамента Министерства обороны Российской Федерации. Окончил Военную академию ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого в 2004 году. Область научных интересов: системы управления, радиофизика, устройства СВЧ и антенны.

*Новиков Артем Николаевич* – кандидат технических наук, специалист научно-исследовательского испытательного центра радиоэлектронных технологий РТУ МИРЭА. Окончил Военную академию ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого в 2007 году. Область научных интересов: системы управления, радиофизика, устройства СВЧ и антенны.