

## Практическая реализация пространственно-временной фильтрации спутниковых навигационных сигналов в реальном времени

Е.И. Глушанков<sup>1</sup> , В.И. Царик<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича  
193232, Россия, г. Санкт-Петербург,  
пр. Большевиков, 22, к. 1  
<sup>2</sup> ООО «Эйртэго»  
197375, Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Вербная, 27, литера А

**Аннотация – Обоснование.** Задача построения помехозащищенных приемников спутниковых навигационных сигналов является весьма актуальной в связи с повышенной уязвимостью таких сигналов к воздействию помех, количество источников которых постоянно растет. **Цель.** Построить пространственно-временной адаптивный фильтр и реализовать его работу в реальном времени в составе помехозащищенной спутниковой навигационной системы. **Методы.** На основе алгоритма пространственной обработки спутниковых сигналов получен пространственно-временной фильтр, приспособленный под реализацию в реальном времени. Описана аппаратура, выбранная для приема спутниковых навигационных сигналов, практической реализации алгоритма фильтрации и демодуляции обработанного сигнала. Проведено компьютерное моделирование фильтрации и демодуляции записей сигналов с использованием полученного алгоритма, а также эксперименты по обработке спутниковых сигналов с разным количеством внешних помех в реальном времени с использованием построенного помехозащищенного приемника. **Результаты.** В результате моделирования и испытаний построенной установки получены значения характеристик работы системы помехозащищенной навигации, соответствующие качественному решению задачи подавления помех в спутниковом навигационном сигнале. **Заключение.** Модель цифровой обработки, основанная на полученном пространственно-временном фильтре, адекватно описывает процесс подавления помех в реальном спутниковом сигнале. Полученный помехозащищенный приемник спутниковых навигационных сигналов работоспособен и может использоваться на практике.

**Ключевые слова** – спутниковая навигация; подавление помех; пространственно-временная фильтрация; ПЛИС; работа в реальном времени.

### Введение

Сигналы глобальных спутниковых навигационных систем обладают повышенной уязвимостью к помехам различной природы ввиду своей слабой мощности вблизи поверхности Земли. Также в последние годы целенаправленное излучение помех начинает представлять все большую угрозу для нормального функционирования технических средств, работа которых полагается на спутниковые навигационные системы. Этим обуславливается высокая актуальность задачи построения помехозащищенных приемников спутниковых навигационных сигналов [1; 2].

Одним из часто используемых методов подавления помех является пространственно-временная фильтрация. Этот метод представляет собой обобщение техники пространственной обработки, увеличивающее количество степеней свободы цифрового фильтра путем добавления в процесс его построения расширенной временной состав-

ляющей сигнала. Данная методика позволяет более эффективно бороться с присутствующими в сигнале помехами, но при этом кратно увеличивает вычислительную сложность алгоритма фильтрации [3]. Вследствие этого практическая реализация пространственно-временных алгоритмов в реальном времени обычно осуществляется с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [2].

Целью данной работы являются построение пространственно-временного фильтра, его практическая реализация в реальном времени в ПЛИС в составе помехозащищенного навигационного приемника (ПНП) и проверка качества работы полученной спутниковой навигационной системы.

### 1. Постановка задачи фильтрации. Построение алгоритма обработки

Задача адаптивной пространственно-временной фильтрации спутниковых навигационных

сигналов имеет следующую постановку [4–6]. В горизонтальной плоскости расположена антенная решетка (АР) с  $N$  антенными элементами. Над решеткой находятся различные источники полезного сигнала (спутники) и помех. Приходящий на АР входной сигнал представляет собой аддитивную смесь полезного сигнала, помех и шума, причем уровень помехи выше уровня полезного сигнала, который, в свою очередь, выше уровня шума. Требуется построить адаптивный пространственно-временной фильтр, выходной сигнал которого будет представлять собой полезный сигнал, выделенный из смеси с помехой и шумом.

За основу пространственно-временного фильтра была взята следующая процедура пространственной обработки [7]. Пусть  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{C}^N$  – входной сигнал фильтра, определенный в дискретные моменты времени  $t = 1, 2, \dots$ ,  $x_1(t) \in \mathbb{C}$  – первый входной канал,  $\tilde{\mathbf{x}}(t) \in \mathbb{C}^{N-1}$  – входной сигнал без первого канала. Тогда выходной сигнал  $y(t) \in \mathbb{C}$  пространственного фильтра можно построить для всех  $t$  как

$$y(t) = x_1(t) + (\mathbf{w}(t), \tilde{\mathbf{x}}(t)), \quad (1)$$

где  $(\cdot, \cdot)$  – скалярное произведение,  $\mathbf{w}(t) = -\hat{R}^{-1}(t)\mathbf{r}(t)$  – веса фильтра, где  $\hat{R}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t)\tilde{\mathbf{x}}^*(t)$  – выборочная оценка корреляционной матрицы входного сигнала; верхний индекс  $*$  – эрмитово сопряжение;  $\mathbf{r}(t) = \bar{x}_1(t)\tilde{\mathbf{x}}(t)$ ;  $\bar{x}$  – число, комплексно сопряженное с  $x$ .

Фильтр (1) можно сделать пространственно-временным, если вместо  $\tilde{\mathbf{x}}(t)$  использовать вектор, полученный конкатенацией векторов  $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ ,  $\tilde{\mathbf{x}}(t+1)$ ,  $\dots$ ,  $\tilde{\mathbf{x}}(t+T-1)$  для некоторого натурального количества  $T$  временных отводов фильтра. Для того чтобы сделать построенную процедуру обработки более подходящей для реализации в ПЛИС, можно вычислять веса фильтра один раз в  $K \in \mathbb{N}$  отсчетов с помощью накопленных суммированием матриц  $\hat{R}_K$  и  $\mathbf{r}_K$ :

$$\mathbf{w}_K = -\hat{R}_K^{-1}\mathbf{r}_K, \quad (2)$$

$$\hat{R}_K = \sum_{t=1}^K \tilde{\mathbf{x}}(t)\tilde{\mathbf{x}}^*(t),$$

$$\mathbf{r}_K = \sum_{t=1}^K \bar{x}_1(t)\tilde{\mathbf{x}}^*(t).$$

Веса  $\mathbf{w}_K$  применяются для вычисления выхода  $y(t)$  для всех  $t \in [1, K]$ , а затем пересчитываются заново для каждого отрезка времени из  $K$  последовательных отсчетов. Такая модификация

позволяет уменьшить вычислительную нагрузку на систему и увеличить численную устойчивость операции обращения корреляционной матрицы и точность ее выборочного приближения [2].

## 2. Использованная аппаратура

Построенный пространственно-временной фильтр был реализован в ПНП, устроенном следующим образом. Входными сигналами ПНП служили спутниковые сигналы, принятые на активную АР, представляющую собой объединение в одном корпусе двух восьмиэлементных кольцевых эквидистантных АР с разными радиусами, соответствующими диапазонам L1 и L2. После прихода на АР спутниковые сигналы каждого из диапазонов проходили через каскад «полосовой фильтр (ПФ) – усилитель (У) – ПФ» и сумматор, после чего по кабелю передавались в ПНП. Сигнал, поступивший на вход ПНП, проходил через делитель мощности, после чего результирующие сигналы проходили через каскады «ПФ – У» и смесители, в которых смешивались с гетеродинами, соответствующими каждому из сигнальных диапазонов. Затем сигналы снова проходили через каскады «ПФ – У – ПФ» промежуточной частоты и аналого-цифровые преобразователи (АЦП), после чего подавались на вход ПЛИС AMD Xilinx Kintex UltraScale XCKU035, где выполнялась пространственно-временная обработка. После этого каждый из сигналов попадал в передающий тракт одного из двух трансиверов Analog Devices AD9463, где выполнялась демодуляция сигнала, который затем передавался на вход приемника u-blox ZED-F9P, где происходило решение навигационной задачи. Схема АР и ПНП представлена на рис. 1.

Для данной реализации время накопления  $K$  для выборочного приближения корреляционной матрицы было принято равным 1250 отсчетам при обработке сигнала GPS и 5000 отсчетам для сигналов ГЛОНАСС. Количество  $T$  временных отводов фильтра было принято равным 5.

В табл. 1 приведены данные об использовании алгоритма фильтрации, реализованного на ПЛИС, различных ее ресурсов. Рассматривались соответствующие значения для таких частей ПЛИС, как таблицы поиска (англ. lookup table, LUT), связанная с ними оперативная память (англ. LUTRAM), триггеры (англ. flip-flop, FF), блочная оперативная память (англ. BRAM) и блоки цифровой обработки сигналов (англ. digital signal processing, DSP).

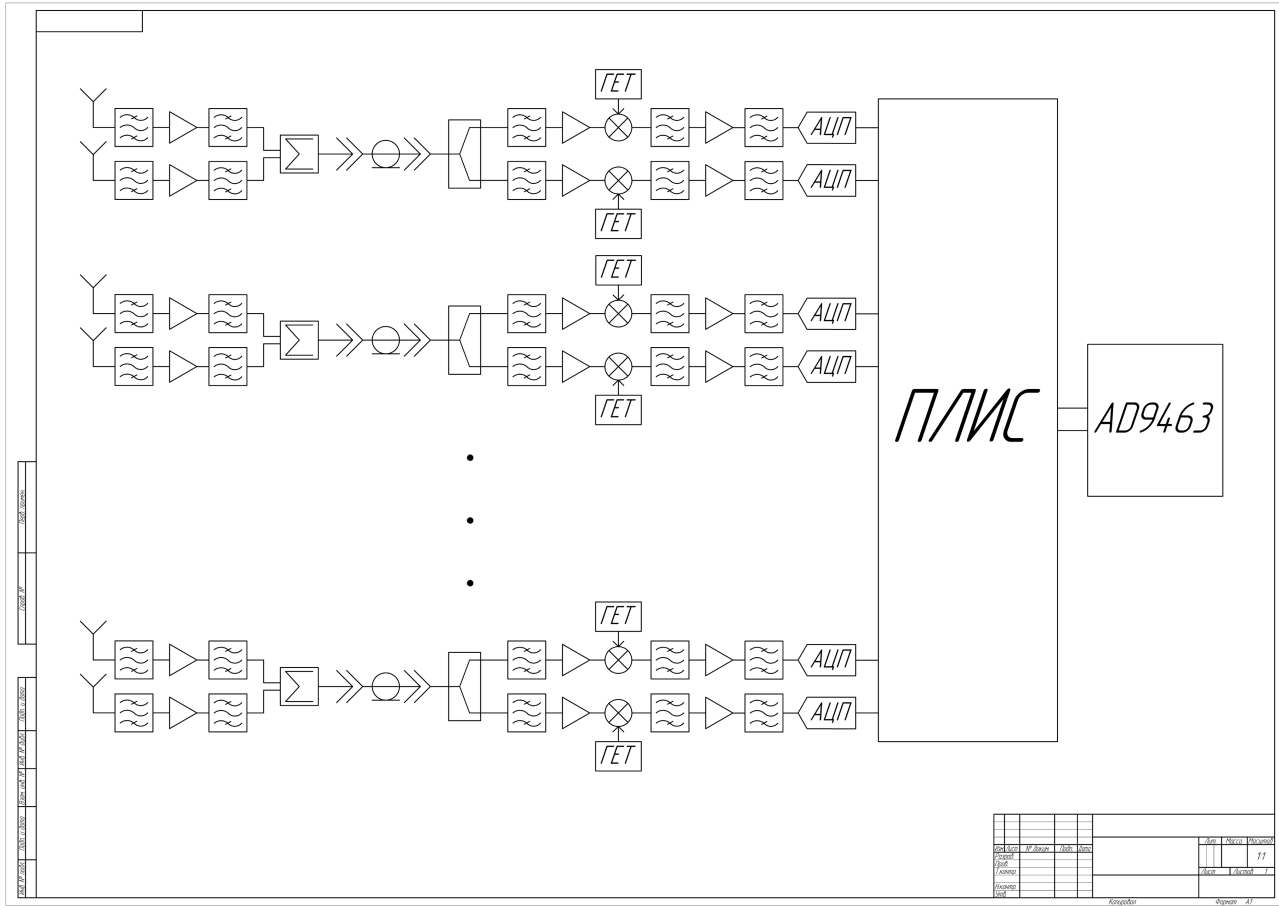


Рис. 1. Схема ПНП и АР

Fig. 1. Antenna array and jamming-protected navigational receiver scheme

Таблица 1. Использование алгоритма фильтрации ресурсов ПЛИС  
Table 1. FPGA resources used by the filtering algorithm

Ресурс	Доступно	Использовано	Использовано, %
LUT	203128	185216	91,18
LUTRAM	112800	47142	41,79
FF	406256	368358	90,67
BRAM	540	405	75
DSP	1700	1435	84,41

Испытания системы приема и обработки спутниковых сигналов проводились применительно к сигналам GPS L1 и ГЛОНАСС L1 и L2. В качестве устройства генерации и излучения некоррелированных широкополосных помех использовалась плата трансивера (ПТ) с системой на кристалле AMD Xilinx Zynq UltraScale+ RFSoc, восемь АЦП и восемь цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП). При работе с сигналами GPS использовались помехи полосой 5 МГц с сигналами ГЛОНАСС – 20 МГц.

### 3. Эксперименты

Перед проведением испытаний алгоритм фильтрации был протестирован путем компьютерного моделирования с использованием записей сигналов GPS L1 с добавлением различного количества некоррелированных помех. При этом измерялись такие характеристики работы алгоритма фильтрации, как коэффициент подавления (КП) помехи, равный отношению мощностей входного и выходного сигналов [7], выраженному в децибелах, а также отношение сигнал/шум (ОСШ) в выходном

Таблица 2. Результаты моделирования и испытаний ПНП  
 Table 2. Modeling and jamming-protected navigational receiver tests results

Количество помех	КП, дБ				ОСШ, дБ			
	GPS (модель)	GPS	ГЛОНАСС L1	ГЛОНАСС L2	GPS (модель)	GPS	ГЛОНАСС L1	ГЛОНАСС L2
1	70	54	44	52	37	39	41	42
2	70	51	38	50	36	40	38	41
3	69	50	34	46	39	41	33	42
4	69	48	29	40	43	38	32	40
5	67	40	26	36	38	36	32	37
6	67	38	22	30	41	35	30	35
7	64	35	20	27	38	33	29	34

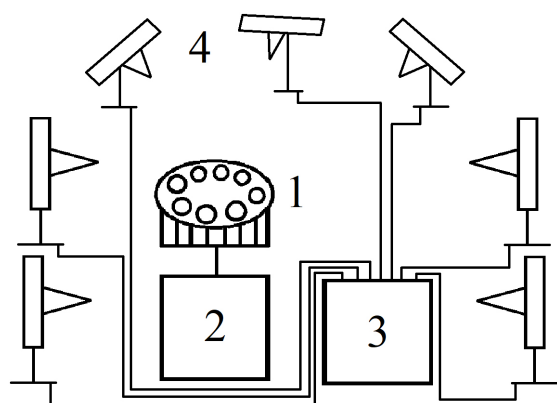


Рис. 2. Схема установки для испытаний. Обозначения: 1 – АР, 2 – ПНП, 3 – ПТ, 4 – излучающие антенны  
 Fig. 2. Tests setting scheme. Designations: 1 – antenna array, 2 – jamming-protected navigational receiver, 3 – transceiver circuit board, 4 – radiating antennae

сигнале. Цифровая фильтрация с измерением КП была реализована в виде обработки программой на языке C++. Значения ОСШ были получены в результате работы цифрового приемника спутниковых сигналов SoftGNSS [8], реализованного в среде MATLAB. Полученные значения характеристик работы модели приведены в табл. 2 в соответствующем столбце.

После моделирования были проведены испытания ПНП для сигналов всех типов и диапазонов с измерением тех же характеристик работы. Эксперименты по приему и обработке спутниковых сигналов проводились на крыше здания, под открытым небом. На расстоянии 3 м по кругу от ПНП с АР было размещено 7 излучающих антенн, равноудаленных друг от друга и подключенных к выходам ЦАП ПТ. Схема установки для испытаний изображена на рис. 2. Рассматривалось несколько сигнально-помеховых ситуаций, отличавшихся количеством излучаемых помех (от 1 до 7).

Во всех случаях после фильтрации через достаточно короткое время приемник входил в режим Fixed, то есть получал навигационное решение. Результаты испытаний приведены в табл. 2 в соответствующих столбцах.

Для каждой сигнально-помеховой ситуации проводилось по три эксперимента, в которых обрабатывались выборки длиной  $10^5$ ,  $10^6$  и  $10^7$  отсчетов. Если задать желаемую точность как  $\varepsilon = 10^{-5}$ , то нетрудно убедиться, что выполняется неравенство

$$\frac{\varepsilon \sqrt{N_e}}{\sigma} \leq \tau(\alpha, \nu),$$

где  $N_e = 3$  – количество экспериментов;  $\sigma = 5,4745 \cdot 10^6$  – стандартное отклонение набора длин выборок;  $\tau = 4,303$  – значение распределения Стьюдента при  $\alpha = 0,95$ ,  $\nu = N_e - 1$ . Это означает, что данный набор длин выборок удовлетворяет критерию Стьюдента и является достаточным для получения достоверных результатов экспериментов [9].

Из результатов моделирования и экспериментов с ПНП можно сделать следующие выводы. В модельном случае построенный алгоритм пространственно-временной обработки позволяет получить достаточно большие значения КП и ОСШ, что говорит о хорошем качестве работы алгоритма в упрощенных модельных условиях. Значения КП, полученные при испытаниях ПНП, заметно ниже модельных данных, однако значения ОСШ при этом получились лишь незначительно ниже. В совокупности с фактом получения навигационного решения во всех экспериментах это означает, что построенный ПНП справляется с поставленной задачей. Также можно отметить, что динамика изменения значений КП в зависимости от ко-

личества помех в реальном и модельном случаях гораздо более схожая, чем аналогичная динамика изменения значений ОСШ.

### Заключение

В данной работе было проведено построение адаптивного алгоритма пространственно-временной обработки спутниковых навигационных сигналов и описание его практической реализации в ПЛИС в составе ПНП, а также приведены

результаты моделирования работы полученного алгоритма и испытаний ПНП в различных сигнально-помеховых ситуациях. На основе результатов экспериментов были сделаны выводы о работоспособности и эффективности построенного алгоритма фильтрации как в модельном варианте, так и в составе реального ПНП, что позволяет рекомендовать использование данного алгоритма при создании систем помехозащищенной спутниковой навигации в будущем.

### Список литературы

1. A survey on coping with intentional interference in satellite navigation for manned and unmanned aircraft / R. Morales-Ferre [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020. Vol. 22, no. 1. P. 249–291. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2949178>
2. Xu H., Cui X., Lu M. An SDR-based real-time testbed for GNSS adaptive array anti-jamming algorithms accelerated by GPU // Sensors. 2016. Vol. 16, no. 3. P. 356. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16030356>
3. Ястребов А., Мякинков А. Влияние способа размещения компенсационных каналов на качество подавления активных шумовых помех автокомпенсатором в радиолокаторе с антенной решеткой // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17, № 1. С. 67–72.
4. Нечаев Ю., Пешков И. Исследование цифрового диаграммообразования для оптимального помехо- и шумоподавления в антенных решетках различной формы с направленными излучателями // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 2. С. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.73-82>
5. Глушанков Е.И., Царик В.И. Анализ качества алгоритмов адаптивной пространственной и пространственно-частотной фильтрации сигналов в системах спутниковой навигации // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8, № 3. С. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2022-8-3-37-43>
6. Глушанков Е.И., Царик В.И. Прямые методы адаптации линейных и кольцевых антенных решеток в навигационных спутниковых системах // Известия высших учебных заведений России. Радиотехника. 2023. Т. 26, № 1. С. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-1-6-16>
7. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
8. A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach / K. Borre [et al.]. Boston: Birkhäuser, 2007. 188 p.
9. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов / В.Г. Блохин [и др.]; под ред. О.П. Глудкина. М.: Радио и связь, 1997. 232 с.

### Информация об авторах

**Глушанков Евгений Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия.

*Область научных интересов:* методы обработки сигналов, помехоустойчивое кодирование, сигнально-кодовые конструкции.

*E-mail:* [glushankov57@gmail.com](mailto:glushankov57@gmail.com)

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-4148-3208>

**Царик Владимир Игоревич**, магистр по направлению «Прикладная математика и информатика» (Санкт-Петербургский государственный университет, 2020 г.), соискатель ученой степени кандидата технических наук, ведущий инженер ООО «Эйртэго», г. Санкт-Петербург, Россия.

*Область научных интересов:* помехозащищенная спутниковая навигация.

*E-mail:* [wladimirzarik@mail.ru](mailto:wladimirzarik@mail.ru)

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-3428-9976>

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2023, vol. 26, no. 2, pp. 64–69

DOI [10.18469/1810-3189.2023.26.2.64-69](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.2.64-69)

UDC 621.396.67



Original Research

Received 15 April 2023

Accepted 15 May 2023

Published 30 June 2023

## Practical realization of space-time filtering of satellite navigation signals in real time

Yevgeniy I. Glushankov<sup>1</sup> , Vladimir I. Tsarik<sup>2</sup> 




<sup>1</sup> The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications  
22, bld. 1, Avenue Bolshevikov,  
Saint Petersburg, 193232, Russia  
<sup>2</sup> Airtago  
27, Verbnaya Street,  
Saint Petersburg, 197375, Russia

**Abstract – Background.** The problem of satellite navigation signals' jamming-protected receivers design is quite relevant due to the high vulnerability of such signals to the influence of interferences whose sources number is constantly increasing. **Aim.** To design a space-time adaptive filter and to implement its work in real-time as a part of jamming-protected satellite navigation system. **Methods.** The space-time filtering method fitted for the real-time realization is obtained based on the satellite signal space processing algorithm. The apparatus chosen for the satellite navigation signals reception, the filtering algorithm practical realization and the processed signal demodulation is described. The computer modeling of the signals records filtering and demodulation using the obtained algorithm as well as the real-time experiments in satellite signals processing with different numbers of outer jammers using the constructed jamming-protected receiver are carried out. **Results.** As a result of modeling and experiments with the designed set the values of performance characteristics of the jamming-protected navigation system are yielded which correspond to a good quality solution of the interference mitigation problem in a satellite navigation signal. **Conclusion.** The digital processing model based on the obtained space-time filter adequately describes the interference mitigation process in a real satellite signal. The obtained jamming-protected satellite navigation signal receiver is functional and can be used in practice.

**Keywords** – satellite navigation; interference mitigation; space-time filtering; FPGA; real-time performance.

✉ wladimirzarik@mail.ru (Vladimir I. Tsarik)

 © Yevgeniy I. Glushankov, Vladimir I. Tsarik, 2023

## References

1. R. Morales-Ferre et al., “A survey on coping with intentional interference in satellite navigation for manned and unmanned aircraft,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 249–291, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2949178>.
2. H. Xu, X. Cui, and M. Lu, “An SDR-based real-time testbed for GNSS adaptive array anti-jamming algorithms acceler,” *Sensors*, vol. 16, no. 3, pp. 356, 2016, doi: <https://doi.org/10.3390/s16030356>.
3. A. Yastrebov and A. Myakin'kov, “Influence of the method of placement of compensation channels on the quality of suppression of active noise interference by an auto-compensator in a radar with an antenna array,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 67–72, 2014. (In Russ.)
4. Yu. Nechaev and I. Peshkov, “Study of digital beamforming for optimal interference and noise suppression in antenna arrays of various shapes with directional radiators,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 73–82, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.73-82>. (In Russ.)
5. E. I. Glushankov and V. I. Tsarik, “Analysis of the quality of algorithms for adaptive spatial and spatial-frequency signal filtering in satellite navigation systems,” *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi*, vol. 8, no. 3, pp. 37–43, 2022, doi: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2022-8-3-37-43>. (In Russ.)
6. E. I. Glushankov and V. I. Tsarik, “Direct methods for adapting linear and ring antenna arrays in navigation satellite systems,” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika*, vol. 26, no. 1, pp. 6–16, 2023, doi: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-1-6-16>. (In Russ.)
7. A. I. Perova and V. N. Kharisova, Eds., *GLONASS. Principles of Construction and Operation*. Moscow: Radiotekhnika, 2010. (In Russ.)
8. K. Borre et al., *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach*. Boston: Birkhäuser, 2007.
9. V. G. Blokhin et al., *Modern Experiment: Preparation, Conduct, Analysis of Results*, O. P. Gludkin, Ed. Moscow: Radio i svyaz', 1997. (In Russ.)

## Information about the Authors

**Yevgeniy I. Glushankov**, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Radiosystems and Signal Processing, the Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia.

*Research interests:* signal processing methods, error correction codes, signal-coding constructions.

*E-mail:* [glushankov57@gmail.com](mailto:glushankov57@gmail.com)

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-4148-3208>

**Vladimir I. Tsarik**, Master Degree in Applied Mathematics and Computer Science (Saint Petersburg State University, 2020), leading engineer of Airtago LLC, Saint Petersburg, Russia.

*Research interests:* jamming-protected satellite navigation.

*E-mail:* [wladimirzarik@mail.ru](mailto:wladimirzarik@mail.ru)

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-3428-9976>