

Труды МАИ. 2025. № 140
Trudy MAI. 2025. No. 140. (In Russ.)

Научная статья

УДК 004.627

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184071>

EDN: <https://www.elibrary.ru/PUDNUJ>

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР МЕТОДА СЖАТИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Вадим Борисович Поляков¹, Наталья Александровна Игнатова²,

Антон Александрович Сенцов³✉, Сергей Александрович Иванов⁴

^{1,2,3}Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

¹yadim7702@yandex.ru

²ignatalja@gmail.com

³toxx@list.ru✉

⁴kabalustuk@mail.ru

Аннотация. В настоящее время производство беспилотных летательных аппаратов стало широко распространенным и экономически оправданным направлением из-за существенно меньшей стоимости создания и эксплуатации по сравнению с пилотируемыми при равной эффективности выполняемых задач. Большое число выполняемых задач, наличие на борту оборудования для обеспечения управления и/или автономности и ограниченное время полета приводят к тому, что к бортовому оборудованию предъявляются жесткие требования по массе полезной нагрузки. В

ходе выполнения полетных заданий необходимо вести накопление и/или ретрансляцию получаемых данных в течение 24-40 часов, в связи с чем задача компрессии радиолокационных данных в беспилотных комплексах является востребованной и актуальной. Также потребность сжимать радиолокационные данные в настоящее время возникает при модернизации самолетов, оснащённых современными радиолокационными станциями с высоким разрешением, способных находиться длительное время в полете, что связано с необходимостью регистрации и хранения объемного потока данных. Искомый метод должен не просто решать возникшую проблему длительной записи в ограниченный объем памяти, обеспечивать необходимый коэффициент сжатия и уровень потерь, но и учитывать особенности радиолокационных данных. Рассмотрены методы сжатия радиолокационных изображений, определены требования, предъявляемые к методу сжатия радиолокационных изображений в бортовых устройствах, применяемому для увеличения скорости записи объемного потока данных и ретрансляции получаемой радиолокационной информации. Представлен алгоритм математических расчетов метода расстановки приоритетов для выбора эффективного решения из множества. Выполнен многокритериальный выбор метода сжатия радиолокационных данных с помощью алгоритма расчета эффективности применения и метода расстановки приоритетов.

Ключевые слова: радиолокационные данные, методы компрессии радиолокационной информации, метод многокритериального выбора, алгоритмы сжатия изображений, радиолокационные изображения

Для цитирования: Поляков В.Б., Игнатова Н.А., Сенцов А.А., Иванов С.А.

Многокритериальный выбор метода сжатия радиолокационных данных // Труды

МАИ. 2025. № 140. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184071>

Original article

MULTI-CRITERIA SELECTION OF THE RADAR DATA COMPRESSION METHOD

Vadim B. Polyakov¹, Natalia A. Ignatova², Anton A. Sentsov³✉, Sergey A. Ivanov⁴

^{1,2,3}Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,

Saint Petersburg, Russian Federation

⁴Saint-Petersburg State University of Economics Saint,

Petersburg, Russian Federation

¹vadim7702@yandex.ru

²ignatalja@gmail.com

³toxx@list.ru✉

⁴kabalustuk@mail.ru

Abstract. Currently, the production of unmanned aerial vehicles has become a widespread and economically justified direction due to the significantly lower cost of creation and operation compared to manned ones with equal efficiency of the tasks performed. The large number of tasks performed, the availability of control and/or autonomy equipment on board, and the limited flight time lead to strict requirements for payload weight for on-board equipment. During the execution of flight missions, it is necessary to accumulate and / or relay the received data within 24-40 hours, and therefore the task of compressing radar data in unmanned complexes is in demand and relevant. Also, the need to compress radar data

currently arises during the modernization of aircraft equipped with modern high-resolution radar stations capable of being in flight for a long time, which is associated with the need to register and store a voluminous data stream. The desired method should not only solve the problem of long-term recording in a limited amount of memory, provide the necessary compression ratio and loss level, but also take into account the peculiarities of radar data. The methods of compression of radar images are considered, the requirements for the method of compression of radar images in on-board devices used to increase the speed of recording a volumetric data stream and relaying the received radar information are determined. An algorithm for mathematical calculations of the prioritization method for choosing an effective solution from a set is presented. A multi-criteria selection of the radar data compression method was made using the algorithm for calculating the effectiveness of the application and the prioritization method.

Keywords: radar data, methods of radar information compression, multi-criteria selection method, image compression algorithms, radar images

For citation: Polyakov V.B., Ignatova N.A., Sentsov A.A., Ivanov S.A. Multi-criteria selection of the radar data compression method. *Trudy MAI*. 2025. No. 140. (In Russ.).

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184071>

1. Актуальность задачи сжатия радиолокационных данных

Необходимость хранения и передачи информации в радиолокационных системах (РЛС) является неотъемлемым свойством их функционирования, с чем связана актуальность задачи выбора надежного и качественного метода сжатия.

Изначально компрессия данных в РЛС требовалась ввиду ограниченного объема памяти и полосы пропускания каналов связи. Но даже с появлением миниатюрных микросхем памяти большого объема и интерфейсов передачи данных с большой пропускной способностью необходимость требования сжатия данных не уменьшилась. РЛС высокого разрешения, использующие для зондирования сложные сигналы с линейной частотной, фазокодовой модуляцией, передают данные в цифровом виде (десятки Мбит/с) в реальном времени по существующим каналам связи.

Так из-за существенно меньшей стоимости создания и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при равной эффективности выполняемых задач по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами (ПЛА) в настоящее время производство БПЛА стало широко распространенным и экономически оправданным направлением. Низкая стоимость, доступность и простота в использовании привели к появлению огромного количества БПЛА, управляемых гражданскими пользователями в различных отраслях промышленности и сферы услуг [1, 2].

Большое число выполняемых БПЛА задач, наличие на борту оборудования для обеспечения управления и/или автономности и ограниченное время полета приводят к тому, что к бортовому оборудованию предъявляются самые жесткие требования по массе полезной нагрузки.

Учитывая то, что БПЛА уже оснащаются РЛС для мониторинга обширных территорий, а также оценки состояния лесов и земель сельскохозяйственного назначения, необходимо вести накопление и/или ретрансляцию получаемых данных

в течение 24-40 часов, становится очевидным, что задача компрессии радиолокационных данных в беспилотных комплексах востребована и требует вариантов решения.

Таким образом, в настоящее время широкое распространение и развитие БПЛА является одним из условий актуальности задачи сжатия радиолокационных данных. Также потребность сжимать радиолокационные данные в настоящее время возникает при модернизации самолетов, оснащённых современными РЛС с высоким разрешением, способных находиться длительное время в полете, что связано с необходимостью записи объемного потока данных.

2. Особенности сжатия радиолокационных данных

Данные, принятые от локатора, проходят предварительную обработку и преобразуются в радиолокационные изображения (РЛИ).

С одной стороны, в цифровом виде РЛИ определяется как двумерная функция $f(x,y)$, где x,y - координаты на плоскости, а сама функция представляет собой интенсивность или уровень “серого”, то есть является обычным цифровым растровым изображением [3-5]. С другой стороны, радиолокационные изображения отличаются от оптических следующими свойствами.

1. Контраст отметок объектов и участков местности на РЛИ зависит от диэлектрических свойств их поверхностей. Более контрастно при этом отображаются объекты с металлической поверхностью.

2. Наилучшее разрешение РСА составляет значение порядка 1 м, тогда как в оптических средствах составляет десятки сантиметров, поэтому большинство объектов не распознаются на РЛИ по форме.

3. Неоднородность и нестационарность фоновых отражений обуславливается наличием чередующихся участков земной поверхности с ярко выраженным различием в интенсивности рассеяния, например: вода-суша, лес-поле, луг – бетонное покрытие.

4. Динамический диапазон РЛИ 80-90 дБ (динамический диапазон оптических изображений в среднем ~50дБ).

5. Наличие зернистости (спекл-структура) РЛИ.

6. РЛИ обычно больше по объему: на один пиксель в таких изображениях выделяется по 32 бита.

7. Энтропия у РЛИ выше, чем у оптических изображений [6].

8. У РЛИ важная информация находится как в низкочастотной области, так и в высокочастотной областях в отличие оптических изображений, для которых характерно сосредоточение полезной информации в основном в низкочастотной области.

О визуальном различии оптических и радиолокационных изображений можно судить по радиолокационным и оптическим снимкам одних и тех же объектов. На рисунке 1 для сравнения приведены радиолокационные и оптические изображения городской застройки, на рисунке 2 аналогичные снимки дорог и природных ландшафтов.



(a)



(б)

Рисунок 1. – Радиолокационное (а) и оптическое (б) с разрешением 1 м изображения



(a)



(б)

Рисунок 2. – Радиолокационное (а) и оптическое (б) с разрешением 1 м изображения
дорог и природных ландшафтов.

На РЛИ отчетливо определяются контуры сооружений городской застройки, дороги и особенности ландшафта. При помощи специализированных алгоритмов с

определенной вероятностью можно автоматизировать распознавание объектов на РЛИ [7, 8].

3. Требования к методу сжатия РЛИ

В связи с тем, что и в БПЛА, и в модернизированных самолетах качество записываемой информации имеет принципиальное значение, то вопрос выбора наиболее подходящего метода сжатия для радиолокационных данных требует отдельного рассмотрения.

Искомый метод сжатия изображений должен не просто решать возникшую проблему длительной записи в ограниченный объем памяти, обеспечивать необходимый коэффициент сжатия и уровень потерь, но и учитывать особенности радиолокационных данных, описанные выше [9-11].

Исходя из требования по качеству и особенностей РЛИ, были сформулированы следующие требования к искомому методу сжатия:

- 1) высокий коэффициент сжатия;
- 2) низкие потери качества декодированного изображения;
- 3) высокая скорость сжатия;
- 4) простота и доступность реализаций, открытость кода ПО;
- 5) возможность регулировать параметры сжатия;
- 6) прочие (наличие фильтрации в алгоритме сжатия, П-образность ЧХ

метода сжатия, эффективность на данных с высокой энтропией, учет и использование фрактальных свойств РЛИ, учет и использование текстурных свойств РЛИ).

Сжатие цифровых изображений - развитая область цифровой обработки сигналов, имеет множество направлений и представлена большим числом алгоритмов. Чтобы среди этого множества алгоритмов выбрать подходящий для сжатия радиолокационных данных, из каждого направления были выбраны самые эффективные, после чего к ним применили метод расстановки приоритетов.

В [12-15] была проведена классификация методов сжатия изображений по признаку – вид избыточности информации. На основании этой классификации было выделено четыре основных направления компрессии.

Для поиска метода сжатия радиолокационных данных из каждого направления данной классификации были выбраны от одного до трех наиболее эффективных методов:

1) **арифметическое кодирование** - представитель методов, устраняющих кодовую избыточность;

2) **кодирование LZW** - представитель методов, устраняющих межэлементную избыточность;

3) **JPEG, JPEG2000**, кодирование на основе преобразования **Корунена-Лоэва** (метод главных компонент) - представитель методов, устраняющих психовизуальную избыточность;

4) **фрактальный метод сжатия** - представитель методов, устраняющих структурную избыточность.

4. Метод многокритериального выбора

Проблема выбора наиболее оптимального и эффективного из множества решений встречается часто в разных сферах человеческой деятельности. В данном

случае задача выбора метода сжатия радиолокационных данных с учетом множества влияющих факторов (критериев) и наличием нечетких данных является трудно формализуемой задачей [16-19]. Для упрощения этого выбора был применен метод расстановки приоритетов.

В рассматриваемом случае, целью применения метода расстановки приоритетов является выбор метода сжатия, эффективно работающего на радиолокационных изображениях [20].

Для того, чтобы выбрать правильный вариант из нескольких, согласно методу расстановки приоритетов, необходимо решить следующие задачи:

- определить факторы (параметры), по которым будет производиться сравнение;
- определить приоритет каждого фактора (параметра);
- составить систему сравнения по каждому фактору (параметру);
- получить относительные оценки по каждому фактору (параметру);
- получить относительные оценки по каждому фактору (параметру), с учетом приоритета этого фактора для каждого рассматриваемого варианта;
- получить значение общего показателя эффективности для каждого варианта;
- выбрать наиболее подходящий вариант (метод).

Последовательность получения значений приоритетов по каждому параметру следующая.

1. Эксперты высказывают свои суждения в виде парных сравнений без количественной оценки степени предпочтения в каждой паре.

2. На основе анализа имеющейся информации или с помощью экспертной оценки задаются пределы изменения выраженности данного признака, которые фиксируются в виде отношения крайних членов ранжированного ряда:

$$\frac{X_i^{\max}}{X_i^{\min}} = K_p, \quad (1)$$

где X_i^{\max} - объект с максимальной оценкой параметра;

X_j^{\min} - объект с минимальной оценкой параметра;

K_p - расчетный коэффициент отношения.

3. По найденному K_p рассчитывается y , а по y подбираются коэффициенты a_{ij} :

$$y = \left(\frac{K_p - 1}{K_p + 1} + \sqrt{\frac{0,05}{m}} \right), \quad (2)$$

где m – число оцениваемых объектов,

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 + y, & \text{если } X_i > X_j; \\ 1, & \text{если } X_i = X_j; \\ 1 - y, & \text{если } X_i < X_j; \end{cases} \quad (3)$$

4. Строится квадратная матрица $A = \|a_{ij}\|$ на основе системы парных сравнений и с использованием подобранных коэффициентов a_{ij} .

5. Производится расчет значений приоритетов объектов $P_i(k)$ итеративным способом по формуле:

$$P_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n a_{ij}. \quad (4)$$

Относительный приоритет рассчитывается по формуле:

$$P_i^{OTH}(k) = \frac{P_i(k)}{\sum_{i=1}^n P_i(k)}. \quad (5)$$

В общем виде относительный приоритет для k -ой итерации можно представить следующей формулой:

$$P^{OTH}(K) = \frac{1}{\lambda(k)} A P^{OTH}(k-1); \quad (6)$$

где $k = 1, 2, \dots$ - номер итерации;

$$\lambda(k) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ij} P_i^{OTH}(k-1) - \text{сумма компонент вектора предыдущей итерации.}$$

6. По полученным значениям приоритетов рассчитывается фактический коэффициент отношения K_f и сравнивается с K_p , в случае согласованности коэффициентов задача считается решенной. В противном случае производится корректировка коэффициентов a_{ij} и расчет повторяется.

5. Результаты

По приведенному алгоритму была рассчитана эффективность применения к радиолокационным изображениям рассматриваемых методов сжатия. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Эффективность применения к радиолокационным изображениям рассматриваемых методов сжатия.

| Метод сжатия | Арифметич. кодирование | LZW | JPEG | JPEG2000 | Фрактальный метод | Метод главных компонент |
|-----------------|------------------------|--------|-------|----------|-------------------|-------------------------|
| Общий приоритет | 0,153 | 00,158 | 0,141 | 0,19 | 0,228 | 0,127 |

Сравниваемые методы представлены на рисунке 3 в порядке увеличения приоритета.

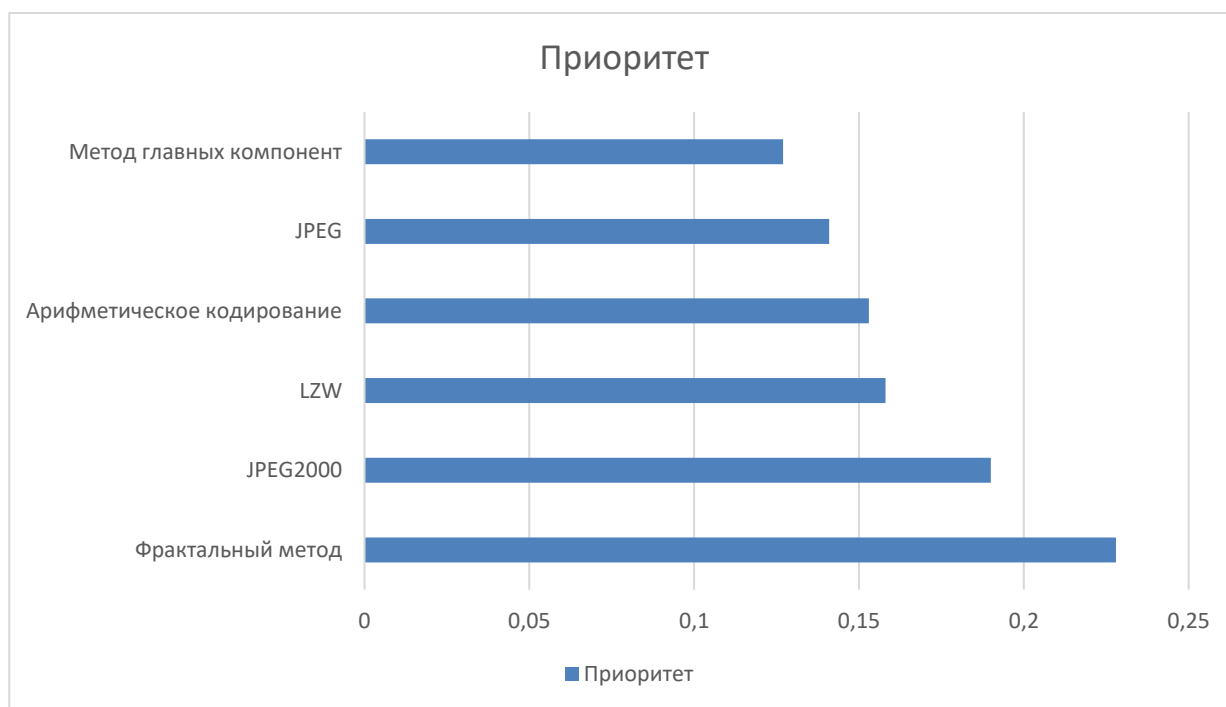


Рисунок 3 – Диаграмма приоритета методов компрессии для сжатия радиолокационных данных

Выводы

Сжатие радиолокационных данных является актуальной задачей, которая в настоящий момент обусловлена модернизацией самолетов и распространением

БПЛА, что предъявляет требования к скорости записи объемного потока данных и/или ретрансляции получаемых данных. Рассмотрены методы сжатия радиолокационных изображений, определены требования, предъявляемые к методу сжатия радиолокационных изображений в бортовых устройствах, применяемому для увеличения скорости записи объемного потока данных и ретрансляции получаемой радиолокационной информации. Представлен алгоритм математических расчетов метода расстановки приоритетов для выбора эффективного решения из множества. Произведен многокритериальный выбор метода сжатия радиолокационных данных с помощью алгоритма расчета эффективности применения и метода расстановки приоритетов. Применение метода расстановки приоритетов для выбора метода сжатия радиолокационных данных показало, что наиболее предпочтительным является фрактальный метод, вторым по предпочтительности является метод с использованием вейвлет-преобразования.

Список источников

1. Макаренко С.И., Тимошенко А.В., Васильченко А.С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146. DOI: [10.24411/2410-9916-2020-10105](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10105)
2. Сенцов А.А., Поляков В.Б., Иванов С.А., Помозова Т.Г. Метод перехвата малоразмерных и малозаметных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ.

2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173033>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-21)

3. Токаревский И.В., Сенцов А.А., Ненашев В.А. Оценка качества демаскирования радиолокационных изображений // VI Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (Санкт-Петербург, март 2024): сборник статей. – СПб.: ГУАП, 2024. – С. 234-238.

4. Балашов Е.В., Сенцов А.А. Моделирование движения диаграммы направленности антенны при коническом сканировании в условиях угловых эволюций носителя // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179697>

5. Нестеров И.М. Влияние сжатия данных на качество радиолокационных изображений // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 1-16.

6. Лежанкин Б.В., Малов А.Н., Малисов Н.П., Ушаков И.И. Вероятностные свойства контурной модели радиолокационного изображения // Компьютерная оптика. 2008. № 1. С. 96-100.

7. Иванов С.А., Сенцов А.А., Ненашев В.А., Турнецкая Е.Л. Совмещение радиолокационных изображений с цифровой картой местности для отображения радиолокационной обстановки в режиме квазиреального времени в многопозиционной системе бортовых РЛС // Научные технологии. 2024. Т. 25, № 2. С. 55-62.

8. Лихачев В.П., Купряшкин И.Ф., Рязанцев Л.Б., Трущинский А.Ю. Способ формирования радиолокационных изображений. Патент RU 2578126 С1, опублик. 20.03.2016.

9. Сидоренко К.А. Мобильная радиолокационная станция. Патент RU 2729704 С1, опубл. 08.11.2020
10. Сенцов А.А., Сергеев М.Б., Григорьев Е.К. О построении интеллектуальной системы управления распределенными радиолокационными средствами для обнаружения объектов малоразмерной авиации в условиях плотной городской застройки // Вестник РФФИ. Фундаментальные проблемы управления беспилотными транспортными средствами «Умного города». № 1 (121). 2024. С. 45-53. DOI: [10.22204/2410-4639-2024-121-01-45-53](https://doi.org/10.22204/2410-4639-2024-121-01-45-53)
11. Никольский Д.Б. Уровни обработки радиолокационных данных // Геоматика. 2008. № 1. С. 25-36.
12. Sergeev A.M., Nenashev V.A., Vostrikov A.A., Shepeta A.P., Kurtyanik D.V. Discovering and Analyzing Binary Codes Based on Monocyclic Quasi-Orthogonal Matrices. In: Czarnowski I., Howlett R., Jain L. (eds). Intelligent Decision Technologies // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2019. V. 143, P. 113-123. DOI: [10.1007/978-981-13-8303-8_10](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8303-8_10)
13. Nenashev V.A., Sergeev A.M., Kapranova E.A. Research and Analysis of Autocorrelation Functions of Code Sequences Formed on the Basis of Monocyclic Quasi-Orthogonal Matrices // Information and Control Systems. 2018. No. 4. P. 9–14. DOI: [10.31799/1684-8853-2018-4-9-14](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-4-9-14)
14. Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. The Problem of Determination of Coordinates of Unmanned Aerial Vehicles Using a Two-Position System Ground Radar // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018. DOI: [10.1109/WECONF.2018.8604329](https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604329)

15. Скрыпник О.Н., Лежанкин Б.В., Малов А.Н., Миронов Б.М., Галиев С.Ф. Формирование классификационной карты подстилающей поверхности по изображениям от когерентного локатора // Компьютерная оптика. 2006. № 29. С. 151-159.
16. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. - М.: Техносфера, 2004. - 368 с.
17. Ненашев В.А., Сенцов А.А. и др. Способ сжатия изображений в пространственно-распределенной системе интенсивного обмена информацией // Третья Международная научная конференция «Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах» (Санкт-Петербург, 10–17 апреля 2023): сборник докладов. – СПб.: ГУАП, 2023. С. 151-155. DOI: [10.31799/978-5-8088-1824-8-2023-3-196-201](https://doi.org/10.31799/978-5-8088-1824-8-2023-3-196-201)
18. Малашкин П.А. Моделирование процедуры регистрации и сжатия радиолокационной информации бортовой контрольно-записывающей аппаратурой // XXII Туполевские чтения (Школа молодых ученых). (Казань, 19–21 октября 2015): сборник докладов. - Казань: КНИТУ-КАИ, 2015. Т. III. С. 493-496.
19. Каменский К.В. Влияние траекторных неустойчивостей и характеристик бортовой навигационной системы на качество радиолокационного изображения при синтезировании апертуры // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168186>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)
20. Дементьев А.Н., Ключев Д.С., Новиков А.Н., Межнов А.С., Питерскова Ю.А., Захарова Е.В., Дементьев Л.А. Развитие методов пространственно-временной обработки широкополосных сигналов в адаптивной антенной решетке // Труды МАИ.

2022. No. 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167170>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-25](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-25)

References

1. Makarenko S.I., Timoshenko A.V., Vasil'chenko A.S. Analysis of means and methods of countering unmanned aerial vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2020. No. 1. P. 109-146. (In Russ.). DOI: [10.24411/2410-9916-2020-10105](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10105)
2. Sentsov A.A., Polyakov V.B., Ivanov S.A., Pomozova T.G. Method of interception of small and inconspicuous unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*. 2023. No. 129. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173033>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-21)
3. Tokarevskii I.V., Sentsov A.A., Nenashev V.A. Assessment of the quality of radar image unmasking. *VI Mezhdunarodnyi forum «Metrologicheskoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologii»* (Saint-Petersburg, March 2024). Saint-Petersburg: GUAP Publ., 2024. P. 234-238.
4. Balashov E.V., Sentsov A.A. Modeling of antenna directional pattern motion during conical scanning under conditions of angular carrier evolutions. *Trudy MAI*. 2024. No. 135. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179697>
5. Nesterov I.M. The effect of data compression on the quality of radar images. *Zhurnal radioelektroniki*. 2016. No. 8. P. 1-16. (In Russ.)
6. Lezhankin B.V., Malov A.N., Malisov N.P., Ushakov I.I. Probabilistic properties of a contour model of a radar image. *Komp'yuternaya optika*. 2008. No. 1. P. 96-100. (In Russ.)

7. Ivanov S.A., Sentsov A.A., Nenashev V.A., Turnetskaya E.L. Combining radar images with a digital terrain map to display the radar situation in quasi-real time in a multi-position on-board radar system. *Naukoemkie tekhnologii*. 2024. V. 25, No. 2. P. 55-62. (In Russ.)
8. Likhachev V.P., Kupryashkin I.F., Ryazantsev L.B., Trushchinskii A.Yu. *Sposob formirovaniya radiolokatsionnykh izobrazhenii*. Patent RU 2578126 S1 (A method for generating radar images. Patent RU 2578126 S1), opubl. 20.03.2016.
9. Sidorenko K.A. *Mobil'naya radiolokatsionnaya stantsiya*. Patent RU 2729704 C1 (Mobile radar station. Patent RU 2729704 C1), opubl. 08.11.2020
10. Sentsov A.A., Sergeev M.B., Grigor'ev E.K. On the construction of an intelligent control system for distributed radar facilities for detecting small-sized aviation objects in dense urban areas. *Vestnik RFFI. Fundamental'nye problemy upravleniya bespilotnymi transportnymi sredstvami «Umnogo goroda»*. No. 1 (121). 2024. P. 45-53. (In Russ.)
DOI: [10.22204/2410-4639-2024-121-01-45-53](https://doi.org/10.22204/2410-4639-2024-121-01-45-53)
11. Nikol'skii D.B. Levels of radar data processing. *Geomatika*. 2008. No. 1. P. 25-36. (In Russ.)
12. Sergeev A.M., Nenashev V.A., Vostrikov A.A., Shepeta A.P., Kurtyanik D.V. Discovering and Analyzing Binary Codes Based on Monocyclic Quasi-Orthogonal Matrices. In: Czarnowski I., Howlett R., Jain L. (eds). *Intelligent Decision Technologies. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2019. V. 143, P. 113-123. DOI: [10.1007/978-981-13-8303-8_10](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8303-8_10)
13. Nenashev V.A., Sergeev A.M., Kapranova E.A. Research and Analysis of Autocorrelation Functions of Code Sequences Formed on the Basis of Monocyclic Quasi-

Orthogonal Matrices. *Information and Control Systems*. 2018. No. 4. P. 9–14. DOI: [10.31799/1684-8853-2018-4-9-14](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-4-9-14)

14. Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. The Problem of Determination of Coordinates of Unmanned Aerial Vehicles Using a Two-Position System Ground Radar. *2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2018. DOI: [10.1109/WECONF.2018.8604329](https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604329)

15. Skrypnik O.N., Lezhankin B.V., Malov A.N., Mironov B.M., Galiev S.F. Formation of a classification map of the underlying surface based on images from a coherent locator *Komp'yuternaya optika*. 2006. No. 29. P. 151-159. (In Russ.)

16. Selomon D. *Szhatie dannykh, izobrazhenii i zvuka* (Compression of data, images and sound). Moscow: Tekhnosfera Publ., 2004. 368 p.

17. Nenashev V.A., Sentsov A.A. ets. A method of image compression in a spatially distributed system of intensive information exchange. *Tret'ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Obrabotka, peredacha i zashchita informatsii v komp'yuternykh sistemakh»* (Saint-Petersburg, April 2023). Saint-Petersburg: GUAP Publ., 2023. P. 151-155. DOI: [10.31799/978-5-8088-1824-8-2023-3-196-201](https://doi.org/10.31799/978-5-8088-1824-8-2023-3-196-201)

18. Malashkin P.A. Modeling the procedure for recording and compressing radar information with on-board control and recording equipment. *XXII Tupolevskie chteniya (Shkola molodykh uchenykh)* (Kazan', October 2015). Kazan': KNITU-KAI Publ., 2015. V. III. P. 493-496.

19. Kamenskii K.V. Trajectory instabilities and onboard navigation system characteristics influence on synthetic aperture radar image quality. *Trudy MAI*. 2022. No.

125. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168186>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)

20. Dement'ev A.N., Klyuev D.S., Novikov A.N., Mezhnov A.S., Piterskova YU.A., Zakharova E.V., Dement'ev L.A. Development of a method for space-time processing of broadband signals in an adaptive antenna array. *Trudy MAI*. 2022. No. 124. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167170>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-25](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-25)

Статья поступила в редакцию 23.11.2024

Одобрена после рецензирования 25.11.2024

Принята к публикации 25.02.2025

The article was submitted on 23.11.2024; approved after reviewing on 25.11.2024; accepted for publication on 25.02.2025