

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

XXVIII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**Волновая электроника
и инфокоммуникационные системы**



Санкт-Петербург, Россия
2025

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения



XXVIII Международная научная конференция

ВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

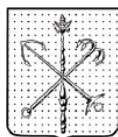


Сборник статей

Часть 1

12–16 мая 2025 г.

Санкт-Петербург



Санкт-Петербург, Россия

2025

УДК 621.38
ББК 32.85
В67

В67 Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXVIII
Междунар. науч. конф. (СПб., 12–16 мая 2025 г.): сб. статей: в 3 ч. Ч. 1. –
СПб.: ГУАП, 2025. – 363 с.
ISBN 978-5-8088-2037-1
ISBN 978-5-8088-2038-8 (Ч. 1)

Материалы XXVIII Международной научной конференции отражают современное состояние волновой электроники и ее применение в информационных и телекоммуникационных системах.

Представляют интерес для широкого круга исследователей, преподавателей, аспирантов и специалистов в области акустооптики, акустоэлектроники.

УДК 621.38
ББК 32.85

ISBN 978-5-8088-2037-1
ISBN 978-5-8088-2038-8 (Ч. 1)

© Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения, 2025

УДК 621.396.96

В. А. Ненашев

кандидат технических наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения**ОБЗОР МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
ИНФОРМАЦИИ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ
БОРТОВЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ РЛС⁶**

Проведен обзор современной научно-технической литературы по новым подходам при построении многопозиционных малогабаритных бортовых РЛС, осуществляющих контроль зон земной поверхности с целью расширения функциональных возможностей однопозиционных РЛС. Для этого предполагается развить и разработать новые модифицированные методы и подходы по формированию и комплексной обработке последовательностей разноракурсных радиолокационных видеокадров, формируемых в различных режимах авиационного контроля за зонами подстилающей поверхности, реализуемого за счет группового технического зрения. Делается вывод о целесообразности комплексирования радиолокационной информации от распределенных бортовых станций многопозиционной системы, что в комплексе позволяет одновременно обеспечить решение задач по обнаружению, определению координат физических наземных объектов, а также картографированию земной поверхности в видеорежиме с классификацией территорий и наблюдаемых на них физических наземных объектов.

Ключевые слова: малогабаритные бортовые РЛС, высокое разрешение, контроль зон земной поверхности, групповое техническое зрение, последовательность радиолокационных видеокадров, авиационный контроль.

V. A. Nenashev

PhD, Tech., Associate Professor

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

**REVIEW OF METHODS FOR PROCESSING RADAR INFORMATION
IN A MULTI-POSITION SYSTEM OF SMALL-SIZED AIRBORNE RADARS**

This article provides a review of modern scientific and technical literature on new approaches to the construction of multi-position small-sized airborne radars monitoring the earth's surface zones in order to expand the functionality of single-position radars. For this purpose, it is proposed to develop and design new modified methods and approaches to the formation and integrated processing of sequences of multi-angle radar video frames generated in various modes of aviation monitoring of underlying surface zones, implemented through group technical vision. A conclusion is made about the feasibility of integrating radar information from distributed airborne stations of a multi-position system, which in combination allows for the simultaneous solution of problems related to detection, determination of coordinates of physical ground objects, as well as mapping of the earth's surface in video mode with classification of territories and physical ground objects observed on them.

Keywords: small-sized airborne radars, high resolution, control of earth surface zones, group technical vision, sequence of radar video frames, aviation control.

⁶ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-10259).

Введение

Одним из перспективных направлений развития радиолокационных систем является переход к многопозиционным реализациям – с несколькими разнесенными передающими и приемными антеннами. Как правило, эти системы базируются на различных видах малых летательных аппаратов (МЛА), например, самолетного, вертолетного и гибридного типов. В этом случае, за счет использования группы МЛА, объединенных в единую сеть, сокращается излишнее время поиска места чрезвычайной ситуации или бедствия. По этим причинам развитие многопозиционных систем бортовых РЛС и реализуемых на их базе способов оперативного мониторинга, на сегодняшний день, является актуальной задачей.

Вопросы и особенности организации многопозиционных бортовых систем, обзор применяемых алгоритмов, а также методов комплексирования радиолокационной информации описаны в работах [1–10].

В частности, в работах [2, 7, 8] описаны основные принципы и особенности построения многопозиционных бортовых радиолокационных комплексов на базе опыта эксплуатации двух и более малогабаритных бортовых РЛС, предназначенных для оперативного контроля зон земной поверхности.

Многопозиционные бортовые радиолокационные системы

Многопозиционные бортовые радиолокационные системы способны однозначно идентифицировать объекты, создающие ложные отметки на индикаторе радиолокационного изображения (РЛИ), что позволяет выделить истинные физические объекты на фоне шумов. Это достигается за счет сопоставления координат объектов, получаемых от нескольких разнесенных в пространстве малогабаритных бортовых РЛС при решении задач обнаружения физических наземных объектов, селекции, определения их координат и параметров движения.

Точность определения дальности до радиоконтрастного объекта зависит в основном от длительности зондирующего импульса, а точность определения азимута – от ширины диаграммы направленности антенной системы. При больших дальностях и широкой диаграмме направленности антенн, элемент разрешения по координате «азимут» при пересчете в линейную шкалу декартовой системы координат, привязанной к поверхности, оказывается несомненно больше элемента разрешения по дальности, что является следствием низкой точности определения азимутальной координаты.

При обмене информацией между РЛС, с учетом их взаимного расположения, осуществляется расчет координат обнаруженных объектов для каждой РЛС. При комплексировании информации точность определения азимутальной координаты может быть повышена на порядок и более. Линейные размеры элемента разрешения на поверхности по дальности и угловой координате при таком комплексировании соизмеримы [2–5].

Применительно к разработке автоматизированной бортовой системы контроля за зонами земной поверхности на базе многопозиционной системы ра-

диолокационных станций требуется расширение обозначенной научной идеи в направлениях:

- расширение функций по предназначению (обзор не только земной поверхности, но и морского побережья, а также морской поверхности с высоким волнением, что имеет свои существенные отличия, особенно, в случаях поиска малоразмерных объектов (человек в воде));
- увеличение разрешения радиолокационных изображений и формирование потока радиолокационных кадров с применением новых и модифицированных методов технического зрения;
- выбор оптимального количества применяемых распределенных бортовых средств;
- развитие методов технического зрения и машинного обучения для формируемого потока радиолокационных кадров высокого разрешения в многопозиционной системе малогабаритных бортовых РЛС;
- развитие методов комплексирования видеопоследовательности радиолокационных кадров, формируемых для передних зон обзора при подлете к объекту или зоне интереса.

Формирование последовательности радиолокационных видеокадров

На данный момент актуальны исследования и разработки технологии технического зрения по формированию последовательности кадров с частотой близкой к видеочастоте на основе модификации метода радиолокационного синтеза апертуры антенны (РСАА). Такой режим функционирования бортовых РЛС в научной литературе называется «ВидеоРСАА». Этот режим применяется при всепогодном наблюдении за интересующей зоной для контроля природных ресурсов, исследования ландшафта, прогноза и оценки стихийных бедствий и т. д.

Проблемы, с которыми сталкиваются исследователи и инженеры систем, функционирующих в режиме «ВидеоРСАА» включают:

- обеспечение высокого разрешения в передней зоне обзора для формируемых кадров с высокой частотой их следования;
- преодоление ограничений, связанных с обнаружением движущихся наземных объектов;
- преодоление ограничений, связанных с ограниченным энергопотреблением на борту малогабаритной РЛС;
- обеспечение обработки данных в режиме реального времени с высокой частотой следования видеокадров.

Обзор методов, методик и особенностей формирования видеопотока радиолокационных кадров освещены в следующих работах [11–30].

В представленных выше работах описаны основные требования к малогабаритным радиолокационным системам (МБРЛС), функционирующим в режиме «ВидеоРСАА». Описаны основные принципы и схемы построения МБРЛС, а также особенности формирования последовательности радиолокационных кадров. Однако, данные системы малоэффективны в условиях оперативного

мониторинга, для которых необходима высокая частота следования кадров, что в зарубежных и отечественных источниках отсутствует.

Заключение

Таким образом, дальнейшие исследования целесообразно провести в направлении развития новых идей и подходов по генерации последовательностей радиолокационных видеок кадров высокого разрешения, формируемых с высокой частотой их следования в многопозиционных системах бортовых РЛС, с разработкой и исследованием новых и модифицированных методов технического зрения и глубокого обучения нейронных сетей.

Кроме того, предполагается, что комплексирование радиолокационной информации от распределенных бортовых станций многопозиционной системы позволит обнаруживать, определять координаты физических наземных объектов, а также осуществлять высокоточное картографирование земной поверхности с возможностью классификации, как наблюдаемых зон, так и объектов на них. Проведенный анализ научной литературы позволяет предположить, что новые методы и алгоритмы комплексирования позволят расширить общую теорию многопозиционных радиолокационных бортовых систем и выполнить требования, предъявляемые к современным авиационным системам высокоточного оперативного контроля в режиме «воздух–поверхность».

Библиографический список

1. Антипов В. С., Викентьев А. Ю., Колтышев Е. Е. Авиационные системы радиовидения: монография / под ред. Г. С. Кондратенкова М.: Радиотехника, 2015. 648 с.
2. Ненасhev В. А., Сенцов А. А. Пространственно-распределенные системы радиолокационного и оптического мониторинга: моногр. СПб.: ГУАП, 2022. 191 с.
3. Nenashev V. A., Sentsov A. A., Shepeta A. P. Formation of Radar Image the Earth's Surface in the Front Zone Review Two-Position Systems Airborne Radar // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russia, 2019. P. 1–5. <http://doi.org/10.1109/weconf.2019.8840641>.
4. Nenashev V. A., Khanykov I. G. Formation of Fused Images of the Land Surface from Radar and Optical Images in Spatially Distributed On-Board Operational Monitoring Systems // Journal of Imaging 7, no. 12: 251, P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/jimaging7120251>.
5. Nenashev V.A., Shepeta D.A., Isakov V.I. Modeling of input signals reflected from coastal zones and observed by small-sized radar systems from UAVs // Journal of Applied Remote Sensing 16(1), 2015, P. 012015-1-012015-12. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.16.012015>.
6. Richard Klemm (ed.). Novel Radar Techniques and Applications. Vol. 2. Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion. London, Scitech Publishing, 2017. 553 p.

7. Пат. 2560082 РФ, МПК G01S 13/90. Способ фронтального синтезирования апертуры антенны земной поверхности с исключением слепых зон в передней зоне с помощью многопозиционной радиолокационной системы / Ю. Ф. Подоплекин, А. П. Шепета, В. А. Ненашев (РФ); заявитель и патентообладатель ГУАП. № 2014100672/07; заявл. 09.01.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23. 8 с.

8. Пат. 2703996 РФ, МПК G01S 13/90. Способ локации целей в передних зонах обзора бортовых радиолокационных станций двухпозиционной радиолокационной системы / Г.А. Коржавин, В. А. Ненашев, А.П. Шепета, Ю.Ф. Подоплекин, А.Г. Давинчук (РФ); заявитель и патентообладатель АО "Концерн "Гранит-Электрон". № 2019108828; заявл. 26.03.2019; опубл. 06.05.2019, Бюл. № 13. 8 с.

9. Пат. 2760873РФ, МПК G01S 13/52. Устройство для определения параметров движения наземных объектов в двухпозиционной системе бортовых малогабаритных РЛС / Ненашев В.А., Григорьев Е. К., Шепета А. П., Подоплекин Ю. Ф. (РФ); заявитель и патентообладатель ГУАП. заявл. № 2021106017; заявл. 09.03.2021; опубл. 01.12.2021, Бюл. № 34. 15 с.

10. Пат. 2756904 РФ, МПК G01S 13/90. Устройство разноракурсного многопозиционного синтезирования комплексного изображения земной поверхности / В.А. Ненашев, И.Г. Ханыков, А.П. Шепета (РФ); заявитель и патентообладатель ГУАП. № 2021107671; заявл. 24.08.2020; опубл. 06.10.2021, Бюл. № 23. 15 с.

11. An Embedded-GPU-Based Scheme for Real-Time Imaging Processing of Unmanned Aerial Vehicle Borne Video Synthetic Aperture Radar / T. Yang, X. Zhang, Q. Xu [et al.] // Remote Sens. 2024. 16. 191. <https://doi.org/10.3390/rs16010191>.

12. High-Precision GPU-Accelerated Simulation Algorithm for Targets under Non-Uniform Cluttered Backgrounds / Y. Zhang, J. Zhou, Z. Song, K. Zhou // Remote Sens. 2023. 15. 4664. <https://doi.org/10.3390/rs15194664>.

13. Citation: Chen, J.; An, D.; Wang, W.; Chen, L.; Feng, D.; Zhou, Z. A Novel Generation Method of High-Quality Video Image for High Resolution Airborne ViSAR. Remote Sens. 2021, 13, 3706. <https://doi.org/10.3390/rs13183706>.

14. Ненашев В. А., Афанасьева В. И., Ненашев С. А. Особенности формирования потока радиолокационных кадров с частотой близкой к видеочастоте. Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации // Тезисы докл. XXXII Междунар. науч.- техн. конф. 2023. 14-20 сентября 2023 г., пос. Дивноморское, Краснодарский край. С. 131–132.

15. Detecting Moving Target on Ground Based on Its Shadow by Using VideoSAR / Z. He, Z. Li, X. Chen [et al.] // Remote Sens. 2021. 13. 3291. <https://doi.org/10.3390/rs13163291>.

16. Imaging for Small UAV-Borne FMCW SAR / X. Hu, C. Ma, R. Hu, T. S. Yeo // Sensors. 2019. 19. 87. <https://doi.org/10.3390/s19010087>.

17. Signal Processing for a Multiple-Input, Multiple-Output (MIMO) Video Synthetic Aperture Radar (SAR) with Beat Frequency Division Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW) / S. Kim, J. Yu, S.-Y. Jeon [et al.] // Remote Sens. 2017. 9. 491. <https://doi.org/10.3390/rs9050491>.

18. Multichannel W-Band SAR System on a Multirotor UAV Platform With Real-Time Data Transmission Capabilities / S. Kim [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 144413–144431. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3014700.
19. Multirotors Video Synthetic Aperture Radar: System Development and Signal Processing / Y. Zhang, D. Zhu, X. Mao [et al.] // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2020. Vol. 35, no. 12. P. 32–43. DOI: 10.1109/MAES.2020.3000318.
20. Moving Target Shadow Analysis and Detection for ViSAR Imagery / Z. He, X. Chen, T. Yi [et al.] // Remote Sens. 2021. 13. 3012. <https://doi.org/10.3390/rs13153012>.
21. FPGA Implementation of SAR Imaging Processing System / R. Liu, D. Zhu, D. Wang, W. Du // 2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Xiamen, China, 2019, P. 1–5. DOI: 10.1109/APSAR46974.2019.9048543.
22. Learning-based High-frame-rate SAR imaging / J. Wu, W. Pu, H. An [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2023. 61. 5208813.
23. Video SAR Moving Target Indication Using Deep Neural Network. IEEE Trans / J. Ding, L. Wen, C. Zhong, O. Loffeld // Geosci. Remote Sens. 2020. 58. 7194–7204.
24. *Wen L., Ding J., Loffeld O.* Video SAR Moving Target Detection Using Dual Faster R-CNN. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2021, 14, 2984–2994.
25. Ground Moving Target Tracking and Refocusing Using Shadow in Video-SAR / X. Yang, J. Shi, Y. Zhou [et al.] // Remote Sens. 2020. 12. 3083.
26. Implementation Method of Automotive Video SAR (ViSAR) Based on Sub-Aperture Spectrum Fusion / P. Guo, F. Wu, S. Tang [et al.] // Remote Sens. 2023. 15. 476.
27. Doppler Shifting Technique for Generating Multi-Frames of Video SAR via Sub-Aperture Signal Processing / C. K. Kim, M. T. Azim, A. K. Singh, S. O. Park // IEEE Trans. Signal Process. 2020. 68. 3990–4001.
28. Generation of Multiple Frames for High Resolution Video SAR Based on Time Frequency Sub-Aperture Technique / C. Yang, Z. Chen, Y. Deng [et al.] // Remote Sens. 2023. 15. 264.
29. *Cheng Y., Ding J., Sun Z.* Processing of airborne video SAR data using the modified back projection algorithm // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2022. 60. 5238013.
30. Generalized Persistent Polar Format Algorithm for Fast Imaging of Airborne Video SAR / J. Jiang, Y. Li, Y. Yuan, Zhu Y. Remote Sens. 2023. 15. 2807. <https://doi.org/10.3390/rs15112807>.