

УДК 621.396

DOI: 10.31799/978-5-8088-1917-7-2024-5-136-140

**В. А. Ненашев\***

кандидат технических наук, доцент

\* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## МЕТОД ОБЪЕДИНЕНИЯ ПОТОКОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КАДРОВ В ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Разработан метод объединения потоков радиолокационных кадров (РЛК), сформированных в режимах авиационного мониторинга на базе малогабаритных бортовых радиолокационных станций (БРЛС) двухпозиционной пространственно-распределенной системы, реализуемый на основе комплексной обработки потоковой передаваемой между беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) радиолокационной информации. Предлагается рассмотреть особенности объединения РЛК наблюдаемой территории, сформированных с двух различных ракурсов обзора в пространственно-распределенной системе. Этот метод объединения потоков РЛК, реализован на основе метода комплексирования разноракурсной радиолокационной информации с виртуальной моделью местности, которая служит связующим звеном между различными ракурсами наблюдения БРЛС, формирующих РЛК в одно информационное поле освещения радиолокационной обстановки в передних зонах обзора. Данный результат позволит актуализировать виртуальную модель местности вне зависимости от погодных и сезонных условий, а также других деструктивных воздействий в отличие от оптических систем авиационного мониторинга.

**Ключевые слова:** малогабаритная бортовая радиолокационная станция, поток радиолокационных кадров, объединение кадров потока, высокое разрешение, разноракурсные режимы обзора, виртуальная модель местности, синтезирование апертуры антенны.

**V. A. Nenashev\***

PhD, Tech., Associate Professor

\* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## METHOD OF COMBINING RADAR FRAME STREAMS IN A SPATIALLY DISTRIBUTED SYSTEM OF SMALL-SIZE AIRBORNE RADARS

A method of combining the streams of radar frames formed in the modes of aviation monitoring on the basis of small-size airborne radars (SARs) of two-position spatially distributed system, realized on the basis of complex processing of radar information streams transmitted between UAVs, is developed. It is proposed to consider the peculiarities of combining the radar streams of the observed territory, formed from two different viewing angles in the spatially distributed system. This method of combining radar streams is realized on the basis of the method of complexing multiview radar information with a virtual terrain model, which serves as a link between the different angles of observation of UAVs, forming radar into one information field of illumination of the radar situation in the front viewing areas. This result will allow to actualize the virtual terrain model regardless of weather and seasonal conditions, as well as other destructive influences in contrast to optical systems of aviation monitoring.

**Keywords:** small-size airborne radar, radar frame stream, stream frame merging, high resolution, multi-view modes, virtual terrain model, antenna aperture synthesis.

### Введение

В настоящее время применение малогабаритных бортовых радиолокационных станций (БРЛС) имеет широкую область применения: охранное наблюдение, реагирование на чрезвычайные ситуации, визуальное радиолокационное исследование местности, мониторинг железнодорожных путей, трубопроводов, картографирование сельскохозяйственных угодий и т. д. [1–24].

Преимущества использования малогабаритных для задач сбора информации о земной поверхности: позволяют за короткий промежуток времени охватить обширные участки наблюдаемого пространства, информировать оператора о наличии наблюдаемых физических наземных объектов (ФНО) в зоне действия в реальном масштабе времени. Кроме того, они имеют высокую эффективность работы в неблагоприятных метеоусловиях и возможность формировать потоки радиолокационных кадров (РЛК) в любое время суток.

Формирование РЛК-потока с частотой, близкой к видеочастоте, позволит объединять данный поток с аналогичным потоком радиолокационных снимков, сформированном на втором БРЛС, в единый поток для более эффективного решения задач классификации и распознавания наземных территорий и объектов на них [3–5]. Кроме того, разработка данного метода позволит отображать на экране оператора поток РЛК высокого разрешения, к которому могут применяться новые и модифицированные алгоритмы технического зрения, что значительно позволит повысить информативность, полноту и достоверность отображаемой радиолокационной обстановки. Это особенно актуально в условиях временных ограничений, когда требуется оперативно обнаружить экологические и техногенные катастрофы, представляющие особую опасность для жизнедеятельности людей и окружающей природы.

Процесс объединения разноракурсных потоков РЛК высокой детальности, сформированных в режиме телескопического синтеза апертуры антенны (ТСАА), заключается в объединении нескольких разноракурсных кадров наблюдаемой поверхности. При этом процесс формирования РЛК может быть осуществлен как с одной БРЛС, так и с нескольких. Кроме того, этот процесс может быть реализован с различных ракурсов наблюдения, в разное время и в разных режимах обзора земной поверхности. Метод объединения РЛК широко применяется для многих задач дистанционного зондирования, например, таких как обнаружение структурных изменений ландшафта земной поверхности, многовременной анализ сформированных объединенных данных, трехмерная реконструкция наблюдаемой территории и т. д.

Таким образом, радиолокационные пространственно-распределенные системы оперативного мониторинга земной поверхности применяются для решения широкого круга задач, связанных с формированием радиолокационных изображений, с обнаружением чего-либо на них, определением координат и автоматическим сопровождением физических наземных объектов малогабаритной БРЛС и последующим распознаванием различных ФНО до класса и типа объекта [1–6].

### Постановка проблемы

Система из двух и более распределенных в пространстве БРЛС обладает существенными преимуществами по сравнению с однопозици-

онной. В частности, двухпозиционные БРЛС обладают возможностью формировать детальные РЛИ и далее определять на них координаты наблюдаемых ФНО как по дальности, так и по азимутальной координате [7–16]. При проектировании многопозиционных распределенных систем требуется поиск новых методов комплексной обработки радиолокационной информации, способных функционировать в режиме реального времени.

В данной работе проводится разработка и исследование метода объединения потоков радиолокационных кадров для двухпозиционной пространственно-распределенной системы в целях реализации комплексной обработки РЛК и их привязки к цифровой модели местности.

Исследование такого разноракурсного подхода по сбору данных решает ряд существенных задач, связанных с повышением детальности формируемых РЛК в передней зоне обзора, от чего в значительной степени зависит оперативность решения поставленной задачи и достоверность распознавания ФНО на земной поверхности.

Цель данного исследования состоит в разработке метода объединения потока РЛК от разнесенных в пространстве БРЛС, функционирующих в режимах реального времени, каждый из которых формирует РЛИ общей зоны наблюдения в единое информационное поле для формирования высокоточного результирующего РЛИ передней зоны из разноракурсных позиций наблюдения в целях обнаружения и определения координат ФНО за минимальный промежуток времени.

### Обзор методов объединения радиолокационных данных от разнесенных в пространстве БРЛС

Однако данная задача по объединению потоков РЛК не является тривиальной, так как сформированные РЛК могут иметь значительные различия между собой, такие как:

- различия в показателях яркости сформированного РЛК;
- геометрические различия (разный масштаб РЛК и наличие поворота и (или) сдвига между РЛК).

В результате этого между кадрами появляется несоответствие, что необходимо оценивать и устранять для обеспечения высокой (субпиксельной) точности при их объединении, необходимой для современных методов объединения РЛК [3–5].

Известно несколько подходов для объединения РЛК потока, сформированных в режиме телескопического синтезирования апертуры антенны (ТСАА), а именно:

- геометрическое объединение РЛК;
- объединение РЛК на основе использования спектральных методов;
- объединение РЛК на основе многомерного метода наименьших квадратов;
- аналитические методы поиска опорных точек для объединения и др. [4–7].

При объединении РЛК, как правило, практически всегда имеется несовпадение положений пикселей, что обусловлено шумами системы наблюдения, пространственной и временной декорреляцией, помехами окружающей среды, а также ограничениями самих алгоритмов объединения потоков кадров. Поэтому необходимы надежные алгоритмы определения функционального преобразования, малочувствительные к различным несовпадениям.

Таким образом, следует вывод, что нет единого метода объединения потока РЛК, удовлетворяющего всем показателям одновременно. И каждый из них применяется в зависимости от конкретной решаемой задачи. Кроме того, эти методы объединения применимы в основном для однородных изображений. Однако для отображения наиболее полной, достоверной и актуальной локационной обстановки требуется применять методы комплексирования информации, в частности, объединение РЛК и виртуальной модели земной поверхности.

### **Метод объединения потока РЛК, сформированных двухпозиционной пространственно-распределенной системой малогабаритных БРЛС**

Разработан метод и получены результаты по объединению РЛК с виртуальной картой местности (ВКМ), находящейся, как правило, в памяти бортового вычислителя. Данный метод используется для построения и актуализации топографических карт земной поверхности, в целях экологического мониторинга зон, требующих повышенного внимания.

Суть объединения двух потоков РЛК заключается в следующем. Необходимо иметь ВКМ в формате цифровых изображений, которые заранее загружены в память вычислителя ЛА. Далее необходимо иметь два видеопотока, полученных под различными ракурсами наблюдения БРЛС в ПРС. Для слияния этой разноракурсной информации – двух потоков РЛК – в одно информационное поле предлагается ис-

пользовать метод объединения этих потоков на основе совмещения РЛК с ВКМ, которая в данном случае используется как связующее звено между различными ракурсами кадров, сформированных разнесенными БРЛС ПРС.

Данный метод привязки кадров к ВКМ реализует процесс объединения, который можно разделить на следующие взаимосвязанные этапы обработки радиолокационной и цифровой топографической информации.

1. Регистрация РЛК земной поверхности, соответствующей радиолокационной бортовой аппаратурой с привязкой данного кадра к системе координат (СК) относительно текущего положения БРЛС.

2. Выделение характерных элементов на зарегистрированном РЛК, сформированном бортовой системой на основе детектирования контуров и границ, а также соответствующих точек контура.

3. Объединение найденных точек контуров в пары для определения вида соответствующего проектного преобразования с целью сопоставления РЛК с ВКМ.

4. Вычисление матрицы гомографии для определения преобразования в СК ВКМ на основе объединенных пар точек контура.

5. Реализация совмещения на основе преобразования между РЛК и проекции на плоскость ВКМ.

6. Далее происходит формирование совмещения между ВКМ и РЛК для нового ракурса.

В результате выполнения приведенного выше метода имеется возможность преобразовать РЛК в плоскость ВКМ, и тем самым объединить эти РЛК, а также актуализировать ВКМ, обеспечив ее высокую детализацию до требуемых необходимых для распознавания ФНО.

### **Заключение**

Разработан метод объединения радиолокационных кадров, сформированных в режимах авиационного мониторинга на базе пространственно-распределенной системы малогабаритных бортовых РЛС, в целях повышения разрешающей способности, требуемой для распознавания объектов на сформированных РЛИ.

Данный метод позволяет осуществлять объединение потоков РЛК на основе комплексирования разноракурсных РЛК с ВКМ, которая служит связующим звеном между различными ракурсами наблюдения БРЛС, формирующих РЛК в одно информационное поле освещения радиолокационной обстановки в передних зонах обзора.

Данный результат позволяет актуализировать виртуальную модель местности вне зависимости от погодных и сезонных условий, а также других деструктивных воздействий в системах авиационного мониторинга в целях оперативного поиска ФНО, попавших в чрезвычайной ситуации или в зону бедствия, а также прогнозировать их положения, что существенно сокращает время на их поиск.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00303).

### Список источников

1. Mahafza B. R. Radar systems analysis and design using MATLAB // Chapman and Hall/CRC. 2016, № 3. P. 743. Doi: <http://dx.doi.org/10.1201/b14904>.
2. Shishanov S. V., Myakinkov A. V. The system of the circular review for vehicles based on ultra-wideband sensors // Journal of the Russian universities. Radioelectronics. 2015, № 2. P. 55–61. (In Russ.)
3. RF design and technology supporting Active Safety in automotive applications / M. Gimignani, M. Paparo, D. Rossi, S. Scaccianoce // 2013 IEEE 10<sup>th</sup> International conference on ASIC [Internet]. IEEE. 2013. P. 1–4. Doi: <http://dx.doi.org/10.1109/asicon.2013.6811875>.
4. Верба В. С., Меркулов В. И. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах // Радиотехника. 2010. № 3. С. 472.
5. Ji Z., Prokhorov D. Radar-vision fusion for object classification // 11<sup>th</sup> International conference on information fusion. 2008. P. 1–7.
6. William L. M., James A. S. Principles of modern radar. Vol. II: Advanced techniques. Scitech publishing, 2013. P. 2.
7. Зайцев Д. В. Многопозиционные радиолокационные системы. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех. М.: Радиотехника, 2007. 96 с.
8. Raol J. R. Multi-sensor data fusion with MATLAB. CRC Press, 2009. 534 p. Doi: <http://dx.doi.org/10.1201/9781439800058>.
9. 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) (Saint-Petersburg, Russia, 2019). 2019. P. 1–5. Doi: <http://doi.org/10.1109/weconf.2019.8840641>.
10. Радиолокационные системы авиационно-космического мониторинга земной поверхности и воздушного пространства: монография / под ред. В. С. Вербы, Б. Г. Татарского. М.: Радиотехника, 2014. 576 с.
11. Ненашев В. А., Шепета А. П. Точностные характеристики определения координат объектов в двухпозиционной системе малогабаритных бортовых РЛС // Информационно-управляющие системы. 2020. № 2. С. 31–36. Doi: <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-2-31-36>
12. Wang R., Deng Y. Bistatic inSAR. Bistatic SAR system and signal processing technology. Singapore: Springer, 2017. P. 235–275. Doi: [http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-3078-9\\_8](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-3078-9_8).
13. Ненашев, В. А., Сенцов А. А., Куюмчев Г. В. Моделирование процесса формирования радиолокационного изображения высокого разрешения в бортовых РЛС // Вопросы радиоэлектроники. 2013. Т. 2, № 3. С. 48–56.
14. Toro G. F., Tsourdos A. UAV sensors for environmental monitoring. Belgrade: MDPI, 2018. 661 p. Doi: <http://dx.doi.org/10.3390/books978-3-03842-754-4>.
15. Novel radar techniques and applications. Vol. 1: Real aperture array radar, imaging radar and passive and multistatic radar. London: Scitech publishing, 2017. Doi: [http://dx.doi.org/10.1049/sbra512f\\_pti](http://dx.doi.org/10.1049/sbra512f_pti).
16. Novel radar techniques and applications. Waveform diversity and cognitive radar and target tracking and data fusion. London: Scitech publishing, 2017.
17. Ненашев В. А., Сергеев А. М., Васильев И. А. Моделирование сложных кодо-модулированных сигналов для современных систем обнаружения и передачи информации // Научная сессия ГУАП: сб. докл. науч. сессии, посвящ. Всемирному дню авиации и космонавтики (Санкт-Петербург, 8–12 апр. 2019 г.): в 3 ч. Ч. II. СПб.: ГУАП, 2019. С. 413–417.
18. Comparative characteristics of anti-collision processing of radio signal from identification tags on surface acoustic waves / A. B. Sorokin, A. P. Shepeta, V. A. Nenashev, G. M. Wattimena // Information and control systems. 2019. № 1 (98). P. 48–56. Doi: [10.31799/1684-8853-2019-1-48-56](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-1-48-56).
19. Nenashev V. A., Shepeta A. P., Kryachko A. F. Fusion radar and optical information in multiposition on-board location systems // 2020 wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF – 2020) (SPb., 1–5 June 2020). SPb., 2020. P. 9131451. Doi: [10.1109/WECONF48837.2020.9131451](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131451).
20. Патент № 2703996 С2 Российская Федерация, 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 [и др.]; заявитель Акционерное общество «Концерн „Гранит-Электрон“». № 2019108828. Заявл. 26.03.2019; опубл. 23.10.2019.
21. Махлин А. М., Ненашев В. А., Шепета А. П. Сравнительные характеристики квазиоптимальных

цифровых обнаружителей сверхширокополосных сигналов // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах: XXI Междунар. молодеж. конф. (СПб., 1–5 окт. 2018 г.). СПб.: ГУАП, 2018. С. 257–264.

22. *Ненашев В. А., Ханьков И. Г.* Формирование комплексного изображения земной поверхности на основе кластеризации пикселей локационных снимков в многопозиционной бортовой системе // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20, № 2. С. 302–340. Doi: 10.15622/ia.2021.20.2.3.

23. Совмещение сформированных радиолокационных изображений с цифровой картой местности в бортовых системах оперативного мониторинга зем-

ной поверхности / А. А. Сенцов, В. А. Ненашев, С. А. Иванов, Е. Л. Турнецкая // Труды МАИ. 2021. № 117. С. 1–26. Doi: 10.34759/trd-2021-117-08.

24. *Ненашев В. А., Сеницын В. А., Страхов С. А.* Исследование влияния промышленных помех на характеристики сжатия фазоманипулированных сигналов в первичных РЛС // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды IX общерос. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 16–18 ноября 2016 г.): в 2 т. Т. 2 / Министерство образования и науки Российской Федерации; Балтийский гос. техн. ун-т «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. СПб.: Балтийский гос. техн. ун-т «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. 2017. С. 351–355.