| ТЕХНОСФЕРА | |
|--------------------------------|-----------------|
| рекламно-издательский центр | |
| Ucx.No 0015-Puy or «10» annell | 20 <u>25</u> г. |
| Ha№ | |

По месту требования

СПРАВКА

о приеме рукописи к публикации

Настоящим подтверждается, что статья «Методика совмещения разноракурсных режимов формирования радиолокационных кадров в пространственно-распределенной системе малогабаритных бортовых РЛС», автор Ненашев В.А., к.т.н., принята к публикации в научно-техническом журнале «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» (ISSN 1992-4178) и будет опубликована в №4 за 2025 год.

Журнал размещается в Научной электронной библиотеке (eLibrary.ru), включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и Перечень ВАК.

Заместитель главного редактора научнотехнического журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ»

Ю.С.Ковалевский

Генеральный директор АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА» (учредитель и издатель журнала)

О. А. Казанцева

Методика совмещения разноракурсных режимов формирования радиолокационных кадров в пространственно-распределенной системе малогабаритных бортовых РЛС

В. Ненашев, к.т.н., доцент¹

УДК 621.3 | ВАК 2.2.8

При авиационном контроле подстилающей поверхности с чрезвычайными ситуациями необходимо обнаруживать и отождествлять радиолокационные измерения, соответствующие конкретному физическому наземному объекту в двухпозиционном варианте наблюдения за ним. В статье предлагается методика, объединяющая данные от разноракурсных режимов (бистатического (полуактивного) и активного) формирования радиолокационных кадров высокого разрешения на базе двухпозиционной пространственнораспределенной системы малогабаритных бортовых РЛС.

В последнее годы малые летательные аппараты (МЛА) широко используются в качестве носителей малогабаритных бортовых РЛС (МБРЛС), на базе которых реализуются режимы синтезирования апертуры антенны (САА) [1–3]. Это, с одной стороны, связано с доступностью и увеличением массы полезной нагрузки МЛА. С другой – с уменьшением массогабаритных характеристик МБРЛС с реализацией САА, а также с уменьшением стоимости их отдельных аппаратных устройств и возможностью модульного сбора и компактного размещения на МЛА.

Подобные системы бортового контроля с реализацией САА широко применимы во многих гражданских сферах, где требуется оперативно осуществлять формирование радиолокационных кадров (РЛК) высокого разрешения с распознаванием на них объектов интереса в любых сезонных и погодных метеоусловиях, ночью и днем, а также в условиях ограниченной видимости, например, обусловленной наличием в среде тумана или дыма. Например, при возникновении чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера, а также при поисково-спасательных операциях, где время выполнения является ключевым фактором, так как его минимизация позволит сохранить жизни людей и сократить масштабы ущерба от ЧС.

Поэтому в настоящее время все более актуальны разработки и исследования разноракурсных режимов формирования радиолокационных кадров, реализуемых на базе двухпозиционной пространственно-распределенной системы, которые позволяют оперативно в автоматизированном режиме обеспечить полное и достоверное отображение состояния зон с ЧС.

Также при обзоре территорий земной поверхности с целью распознавания в автоматизированном режиме объектов интереса требуется повышать разрешение радиолокационных кадров, формируемых именно в передних зонах обзора (ПЗО) малогабаритных бортовых РЛС. Это обеспечивается за счет реализации двухпозиционной пространственно-распределенной системы (ДПРС), объединяющей МБРЛС с целью совместного обнаружения и отождествления радиолокационных измерений отдельных физических наземных объектов (ФНО) и уменьшения количества позиций, входящих в нее.

Для формирования РЛК высокого разрешения в ПЗО могут использоваться следующие методы:

- двухпозиционный активный метод синтезирования апертуры антенны [3, 4];
- полуактивный метод бистатического синтезирования апертуры антенны (БиСАА) [5, 6].

Заведующий лабораторией машинного обучения проектно-технологического офиса инженерной школы ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП); доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств ГУАП, nenashev.va@yandex.ru.

Первый метод формирования РЛК в ПЗО функционирует на базе ДПРС, в состав которой входят две МБРЛС, каждая из которых работает в активном режиме. Схема построения ДПРС с реализацией данного метода следующая – на каждой МБРЛС находятся один передатчик и один приемник, которые размещены на одной позиции, и которые осуществляют излучение зондирующих сигналов в одном направлении – переднебокового обзора – и прием с того же ракурса излучения. В результате накопления сигналов, собранных на интервале синтезирования апертуры, и их когерентной обработки формируются РЛК для переднебоковой зоны обзора каждой МБРЛС. Эти же РЛК высокого разрешения после их преобразования являются отображением передней зоны наблюдаемой территории, но для соседней МБРЛС. Далее с позиции, где кадр был сформирован, он передается на соседнюю МБРЛС, где осуществляется его преобразование в новую систему координат с учетом текущей позиции для освещения ПЗО по курсу движения носителя МБРЛС [3, 4, 7].

Следует отметить, что из-за довольно большого объема данных, требуемых для формирования РЛК, их передача на соседнюю МБРЛС может осуществляться не целиком, когда кадр сформирован, а по частям собираемых данных, требуемых для его формирования, в течение интервала накопления в виде отдельных наборов эхо-сигналов с соответствующими им навигационными параметрами. Такой подход позволяет сократить нагрузку на канал обмена данными между аппаратурой связи носителей МБРЛС и обеспечить реализацию режима мягкого реального времени при отображении ПЗО. При этом формирование РЛК осуществляется уже на соседней МБРЛС, но для ракурса позиции, где зондирующий сигнал был излучен и принят.

Второй метод формирования РЛК в ПЗО – бистатическое синтезирование апертуры антенны. Он, так же, как и первый метод, реализуется на базе ДПРС.

Схема построения ДПРС с реализацией данного бистатического метода следующая – передающие и приемные устройства разнесены по позициям в пространстве на некоторое расстояние. То есть, например, излучаемые зондирующие сигналы с МБРЛС₁ на интервале синтезирования, которые далее отражаются от подстилающей поверхности, регистрируются приемным устройством, базирующимся уже на соседней МБРЛС₂, которая не осуществила их первоначальное излучение. И, таким образом, в результате обработки накопленных переотраженных сигналов от наблюдаемой ПЗО реализуется формирование РЛК высокого разрешения.

Этот метод БиСАА имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционным методом формирования РЛК [8, 9], который реализуется на базе однопозиционной системы бортового контроля подстилающей поверхности, а именно:

- позволяет формировать РЛК высокого разрешения в ПЗО, в отличие от традиционного метода САА;
- позволяет уменьшить требования к массогабаритным характеристикам каждой отдельной позиции ДПРС, так как передатчик и приемник размещены отдельно друг от друга, что особо важно в случае базирования таких систем на МЛА;
- обеспечивает получение информации о рассеянии наземных объектов под различными азимутами наблюдения, позволяет обнаруживать невидимые объекты под определенным углом;
- позволяет предъявлять меньшие требования к траектории полета МЛА, чем при традиционном САА;
- обеспечивает скрытность наблюдения и возможность защиты от помех окружающей среды, воздействующих в направлении передающего устройства.

С другой стороны, бистатический метод САА имеет несколько технических сложностей при его реализации, а именно сложность синхронизации работы разнесенных устройств приемника и передатчика.

Это усложняет реализацию метода формирования РЛК с бистатическим САА в аппаратуре МБРЛС.

Таким образом, оба режима имеют свои преимущества и ограничения, поэтому для расширения функциональных возможностей их предлагается объединить в единую методику комплексной обработки. Это позволит повысить разрешение объединенного РЛК, формируемого для ПЗО, что не удается реализовать с одного ракурса и одной позиции МБРЛС ввиду вышеописанных недостатков.

Поэтому целью данного исследования является разработка методики совмещения разноракурсных режимов формирования радиолокационных кадров с САА, формируемых от разнесенных в пространстве МБРЛС, каждая из которых формирует радиолокационные кадры общей ПЗО, в единый комплексный радиолокационный кадр, с одновременным обнаружением, определением координат и распознаванием физических наземных объектов для обеспечения автоматизации и повышения оперативности процесса авиационного контроля зон с ЧС.

ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ МАЛОГАБАРИТНЫХ БОРТОВЫХ РЛС

Процесс совмещения режимов формирования радиолокационных кадров для ПЗО методами САА и БиСАА, реализуемыми на базе объединения и пересылки данных между двумя малогабаритными бортовыми РЛС, входящими в ДПРС, поясняется следующим ее описанием.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



Рис. 1. Взаимное расположение ПЗО и носителей МБРЛС, входящих в ДПРС формирования кадров методами САА и БиСАА: а – освещение передней зоны обзора МБРЛС,; б – освещение передней зоны обзора МБРЛС,

Взаимное расположение ПЗО и носителей МБРЛС, входящих в ДПРС формирования кадров двумя вышеописанными методами, показано на рис. 1. В составы МБРЛС, и МБРЛС₂ входят по одному приемо-передающему устройству (ППУ) и одному приемному устройству (ПУ), а также на каждом МЛА имеется аппаратура связи для обмена данными между ними. В данной ДПРС на каждой МБРЛС реализуется формирование кадров для ПЗО как в режиме САА, так и в режиме БиСАА.

Для описания процесса формирования кадров этими методами САА и БиСАА требуется ввести следующие обозначения для каждого из носителей МБРЛС. Для МБРЛС, регистрацию эхо-сигнала в области быстрого времени, которое согласуется с ячейками дальности, следует обозначить как $T_b = [t_{b1}, t_{b2}, t_{b3}, ..., t_{bn}]$, где n – количество отсчетов дальности. Также введем область медленного времени через параметр $T_m = [t_{m1}, t_{m2}, t_{m3}, ..., t_{mk}]$, где k – количество отчетов для обеспечения разрешения кадра по азимуту, и эта ось медленного времени соотносится с периодом повторения зондирующих импульсов, за счет чего и формируется синтезированная апертура.

Носитель МБРЛС₁ движется вдоль оси Y с начальным положением (0, 0). Аналогичные обозначения времени используются для МБРЛС₂, при этом начальное ее положение находится в точке (d, 0). Оба носителя МБРЛС

осуществляют полет на одинаковой высоте, практически параллельными курсами. При этом ПУ находится на расстоянии *d* вдоль оси **X** от ППУ.

Скорости носителей МБРЛС следует обозначить как V_{r_1} и V_{r_2} , вектор скорости ФНО как (v_x , v_y), а начальное их положение – (x_0 , y_0) в представленной на рис. 1 системе координат (СК).

Во время полета для такого варианта построения ДПРС, согласно рис. 1, реализуется зондирование пачкой маркированных широкополосных импульсных сигналов, а именно с ППУ₁ МБРЛС₁ излучаются сигналы *p*₁ в направлении ПЗО МБРЛС₂ и с ППУ₂ МБРЛС₂ – *p*₂ в направлении ПЗО МБРЛС₁. При этом каждый из переотраженных маркированных сигналов может быть отдельно идентифицирован в совместном канале комплексной обработки радиолокационных данных ДПРС [10].

Далее сигнал p_1 переотражается от подстилающей поверхности, после чего регистрируется двумя

приемными устройствами различных МБРЛС, а именно, ППУ₁, находящимся на МБРЛС₁, регистрируется сигнал q_{11} (накопление которого требуется для формирования кадра переднебоковой зоны обзора МБРЛС₁ в режиме САА на базе ДПРС МБРЛС, в то же время являющейся ПЗО для МБРЛС₂) и ПУ₂, расположенным на МБРЛС₂, – сигнал q_{12} , накопление которого требуется для формирования кадра ПЗО МБРЛС₂ в режиме БиСАА (см. рис. la). Аналогичные действия осуществляются для излучаемого сигнала p_2 , в результате переотражения которого регистрируются сигналы: $q_{21} - ППУ_2$, находящимся на МБРЛС₂ и $q_{22} - ПУ_1$, расположенным на МБРЛС₁ (см. рис. l6).

В результате накопления и обработки вышеописанным методом САА регистрируемого сигнала q_{11} после его пересылки с навигационными параметрами на каждом периоде излучения на МБРЛС₂ формируется РЛК_{С1} для ПЗО МБРЛС₂, а методом БиСАА на том же борту в результате обработки накопленного сигнала q_{12} формируется РЛК_{БиС1} (см. рис. la). Аналогичным образом, на борту МБРЛС₁ на основе обработки передаваемого с МБРЛС₂ на МБРЛС₁ эхо-сигнала q_{21} и регистрируемого ПУ₁ сигнала q_{22} формируются кадры для ПЗО МБРЛС₁, соответственно РЛК_{С2} и РЛК_{БиС2} (см. рис. lб).

Далее каждую пару кадров (РЛК_{ст}, РЛК_{БИСТ}) для ПЗО МБРЛС₂, и аналогичную пару кадров, но для ПЗО МБРЛС₁- (РЛК_{C2}, РЛК_{БиC2}) необходимо преобразовать к одному ракурсу наблюдения.

МЕТОДИКА СОВМЕЩЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КАДРОВ, СФОРМИРОВАННЫХ В РЕЖИМАХ САА И Бисаа на базе двухпозиционной пространственно-распределенной системы малогабаритных бортовых рлс

Данная методика совмещения кадров, сформированных в разноракурсных режимах, реализуемых в ДПРС, на каждой МБРЛС функционирует следующим образом:

- Осуществляются формирование и регистрация кадров ПЗО в режимах САА (активный) и БиСАА (полуактивный), на базе каждой МБРЛС, входящей в ДПРС.
- 2. Реализуется выделение контуров и их характерных точек на двух кадрах ПЗО, сформированных в режимах САА и БиСАА на базе ДПРС МБРЛС.
- Выполняется сопоставление характерных точек контуров, выделенных в п. 2, для определения преобразования в ракурс системы координат цифровой виртуальной модели местности (ЦВММ) для совмещения каждого кадра, зарегистрированного в п. 1.
- Осуществляется определение преобразования в систему координат ЦВММ для каждого кадра режимов САА и БиСАА на основе найденных пар ключевых точек контура.
- 5. Реализуется применение определенного в п. 4 преобразования в ракурс ЦВММ к кадрам, сформированным в режимах САА и БиСАА.
- Выполняется итоговое объединение с коррекцией РЛК, сформированных с САА, и РЛК с БиСАА в ракурс ЦВММ с целью приведения их к общему ракурсу.
- 7. Оценивается точность объединения РЛК с ЦВММ.
- Выполняется выделение радиоконтрастных ФНО на каждом кадре на основе многокритериального алгоритма обнаружения [11, 12].
- Выполняется отождествление радиоконтрастных ФНО.
- Реализуется распознавание с определением координат обнаруженных в п. 8 и отождествленных в п. 9 ФНО на основе нейросетевого подхода [13, 14].

Таким образом осуществляется объединение кадров ПЗО в ракурс ЦВММ на каждой МБРЛС. Это позволяет в режиме реального времени актуализовать ЦВММ с обеспечением высокой детализации формируемых РЛК до разрешений, при которых возможно достоверное отождествление и распознавание обнаруженных ФНО, и таким образом обеспечить выполнение поставленной в данной работе цели.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

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

0000

В работе описаны принципы и особенности реализации системы ДПРС, а также предложена методика, реализующая совмещение двух РЛК высокого разрешения, сформированных в двух различных режимах для ПЗО. Данная методика совмещения позволит повысить разрешение РЛК для эффективного решения задач обнаружения и отождествления физических наземных объектов, а также повышения доли верно распознанных ФНО.

Разработанная методика совмещения двух РЛК в один общий кадр с повышенным разрешением предназначена для автоматизации процесса авиационного контроля за зонами ЧС за счет распознавания ФНО на данном кадре. В методике реализовано совмещение РЛК с ЦВММ, являющейся единым ракурсом, к которому требуется приводить кадры.

Заинтересованность в использовании подобных ДПРС имеется для проведения оперативных поисково-спасательных операций, связанных с поиском и спасением людей на обширных территориях, где целесообразно применение МЛА для увеличения скорости поиска и захвата большей территории в целях ее анализа. Также данная система применима в процессах экологического мониторинга, сопровождения и распознавания наземных объектов, при мониторинге окружающей среды, контроле зон с ЧС, обеспечении охраны заповедников и др.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Kim H.G., Park J.-S., Lee D.-H.** Potential of Unmanned Aerial Sampling for Montoring Insect Populations in Rice Fields // Florida Entomol. 2018. V. 101. PP. 330–334.
- 2. **Klemm R. et al.** Novel Radar Techniques and Applications. Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar. – Scitech Publishing. 2017. 951 p.
- Ненашев В. А., Сенцов А.А. Пространственно-распределенные системы радиолокационного и оптического мониторинга: монография. – г. Санкт-Петербург: редакционно-издательский центр ГУАП, 2022. 191 с.
- Патент № 2703996 С2 Российская Федерация, МПК G01S 13/90. Способ локации целей в передних зонах обзора бортовых радиолокационных станций двухпозиционной радиолокационной системы: № 2019108828: заявл. 26.03.2019: опубл. 23.10.2019 / Г. А. Коржавин, В. А. Ненашев, А. П. Шепета [и др.]; заявитель Акционерное общество «Концерн «Гранит-Электрон».
- Nenashev V.A. Combining data from airborne spatially distributed modes of radar imaging in small-sized airborne radars // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2023. V. 6, No. 1. PP. 299–302.
- Comblet F., Ayari M. Y., Pellen F. and Khenchaf A. Bistatic radar imaging system for sea surface target detection. – Europe Oceans 2005, Brest,

France, 2005. V. 1. PP. 692–697. https://doi.org/10.1109/ OCEANSE.2005.1511798

- Ненашев В. А., Ханыков 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. https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.3
- Ненашев В. А., Бестугин А. Р., Киршина И. А., Антохин Е. А. Формирование потока радиолокационных кадров в пространственно-распределенной системе малогабаритных бортовых РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2024. Т. 78, № 3. С. 59–69.
- Сенцов А.А., Ненашев В.А., Иванов С.А., Турнецкая Е.Л. Совмещение сформированных радиолокационных изображений с цифровой картой местности в бортовых системах оперативного мониторинга земной поверхности // Труды МАИ. 2021. № 117. https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-08
- Nenashev V.A., Nenashev S.A. Search and Study of Marked Code Structures for a Spatially Distributed System of Small-Sized Airborne Radars // Sensors. 2023, 23(15), 6835. https://doi.org/10.3390/s23156835

- Liu, J.; Liu, X.; Chen, H.; Luo, S. MDD-YOLOV8: A Multi-Scale Object Detection Model Based on YOLOV8 for Synthetic Aperture Radar Images // Appl. Sci. 2025, 15, 2239. https://doi.org/10.3390/app15042239
- 12. Сравнительные характеристики квазиоптимальных цифровых обнаружителей сверхширокополосных сигналов / А. М. Махлин, В. А. Ненашев, А. П. Шепета // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах: XXI международная молодежная конференция, Санкт-Петербург, 01–05 октября 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2018. – С. 257–264.
- 13. Ненашев В. А., Ненашев С. А., Бестугин А. Р. и др. Контроль наземных объектов на основе нейросетевого распознавания в авиационных системах технического зрения // Датчики и системы. 2024. № 2(274). С. 57–61.
- 14. Ненашев В.А., Ненашев С.А. Классификация и распознавание наземных объектов в потоке радиолокационных кадров на основе нейросетевого подхода // Автоматизация в промышленности. 2024. № 1. С. 29–33. https://doi.org/10.25728/avtprom.2024.01.07.