

КЛАССИФИКАЦИЯ И РАСПОЗНАВАНИЕ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПОТОКЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КАДРОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА

В.А. Ненашев, С.А. Ненашев (ГУАП)

Освещены вопросы построения пространственно-распределенных систем бортового радиолокационного автоматизированного мониторинга земной поверхности, определены современные требования к разрешающей способности радиолокационных кадров, а также обсуждаются особенности формирования видеопотока радиолокационных кадров для реализации системы классификации и распознавания наземных объектов. Предложена методика классификации и распознавания наземных объектов в потоке радиолокационных кадров на основе нейросетевого подхода и даны рекомендации по дальнейшему их практическому использованию. На первом этапе обработки видеок кадров предлагается оперативно выделить каждый объект в класс с отделением при этом статического фона в видеопотоке радиолокационных кадров. На втором этапе, в целях распознавания объектов выделенного класса, применяются средства технического зрения на основе использования многослойных нейронных сетей¹.

Ключевые слова: видеопоток радиолокационных кадров, сегментация кадров, нейронные сети, выделение наземных объектов, классификация, распознавание, техническое зрение.

Введение

Значимость и актуальность исследований в области автоматизированного многопозиционного бортового мониторинга на основе комплексной обработки потоков радиолокационных кадров и методов технического зрения значительно растет в последнее время [1]. Сложилось устойчивое мнение, что объединение оптических, радиолокационных и других систем мониторинга в единый комплекс является наиболее приемлемым решением для достижения современных требований, предъявляемым к бортовым системам оперативного авиационного мониторинга за земной поверхностью.

Считается, что радиолокационным системам (РЛС) присущи недостатки, связанные с проблемами классификации обнаруженных объектов и типов подстилающих поверхностей. Эти недостатки обуславливают тем, что на радиолокационных изображениях обнаруженные объекты, особенно те, размеры которых меньше элемента разрешения радиолокационной системы, видны просто в виде ярких засвеченных пятен, лишенных каких-либо классификационных признаков, а вопросы классификации довольно успешно решаются современными оптико-локационными системами. Однако объединение оптических и радиолокационных систем не всегда способно обеспечить требуемое повышение информативности и достоверности при отображении локационной обстановки о наблюдаемых зонах и наземных объектах интереса с бортов малых летательных аппаратов.

Таким образом, с одной стороны, существующие оптико-локационные системы, при указанных достоинствах, имеют существенные недостатки, в частности, они обладают небольшой дальностью действия, и их работа зависит от атмосферных и сезонных условий, а также от условий, вызванных техногенной катастрофой и, в некоторых случаях, от условий ограниченного времени на решение поисково-спасательных задач средствами бортового мониторинга, например, сугубо в ночное время.

С другой стороны, радиолокационные бортовые системы свободны от ограничений оптико-локационных систем. Однако для них существует проблема формирования

как радиолокационных изображений высокого разрешения (близкого к оптическому), так и соответствующего потока радиолокационных кадров (аналогично потоку видеок кадров) с возможностью классификации, распознавания обнаруженных объектов и типов подстилающих поверхностей в передней полусфере обзора многопозиционной пространственно-распределенной системы (ПРС) бортовой РЛС.

Решение данной проблемы лежит в смещении внимания в сторону разработки, развития и исследования новых модификаций радиолокационных методов и подходов (особенно многопозиционных), способных качественно заменить оптические системы авиационного мониторинга при решении задач классификации и распознавания наземных объектов, а также задач формирования потока радиолокационных изображений высокого разрешения в передней полусфере, способных работать в условиях различных деструктивных воздействий и ограниченного времени при решении поисково-спасательных задач.

Таким образом, далее в статье для решения поставленных задач показана целесообразность применения ПРС бортовой РЛС комплексной обработки потоков радиолокационных кадров на базе БПЛА. Определены современные требования к разрешающей способности радиолокационных кадров для решения задач классификации и распознавания наземных объектов. Показаны особенности формирования видеопотока радиолокационных кадров для реализации системы классификации и распознавания наземных объектов на основе компьютерного зрения с применением нейросетевых технологий. Описаны процедуры классификации и распознавания наземных объектов на основе методов сегментации и нейросетевого подхода.

Пространственно-распределенная система комплексной обработки потоков радиолокационных кадров

В настоящее время все чаще применяются многопозиционные бортовые системы мониторинга земной поверхности. По ряду причин эти системы базируются на малых беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Во-первых,

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00303).

тактико-технические характеристики БПЛА позволяют использовать все большую по массе и габаритам полезную нагрузку. Во-вторых, сами бортовые локационные системы уменьшаются в своих массогабаритных характеристиках. В-третьих, увеличивается время полета БПЛА как самолетного, так и вертолетного типа для осуществления продолжительного мониторинга земной поверхности. Однако для целей оперативного мониторинга, повышения информативности и своевременного оповещения о чрезвычайных ситуациях и других экологических катастрофах целесообразно использовать многопозиционные системы, состоящие из нескольких ПРС бортовой РЛС, базирующихся на БПЛА [2].

Сравнительный анализ режимов однопозиционной локации показал значительную сложность применения известных способов наблюдения земной поверхности радиолокационными методами для реализации целей оперативного наблюдения с бортов БПЛА, так как известными методами мониторинга довольно затруднительно одновременно охватить все требования такого рода задач. К этим требованиям относятся:

- 1) реализация обзора наблюдаемых зон с обнаружением объектов интереса и с последующим их сопровождением, в том числе людей, за минимальный промежуток времени;
- 2) повышение разрешающей способности по координатам «дальность-азимут» в режиме квазиреального времени;
- 3) обеспечение высокого значения вероятности правильного обнаружения при фиксированном значении вероятности ложной тревоги на фоне шумов и помех.

Последнее требование диктует условие к отношению сигнал/шум, которое должно быть потенциально максимально возможным. Указанные требования приводят к необходимости совершенствования режимов оперативного мониторинга земной поверхности с бортов БПЛА.

Выбор многопозиционного режима обзора позволяет существенно сократить время поиска, что является ключевым фактором при решении задач оперативного мониторинга земной поверхности. Для выполнения первого и третьего требований необходимо осуществлять обзор в передней зоне по курсу движения БПЛА. Такой подход позволяет минимизировать время на поиск физических объектов при проведении поисково-спасательных работ оперативного характера.

Важным аспектом является тот факт, что при выполнении этих операций в передней зоне обзора по курсу движения БПЛА, переносащего бортовую аппаратуру, его траекторию легко скорректировать при подлете прежде, чем наблюдаемая зона будет идентифицирована как зона бедствия или экологической катастрофы. Этот факт позволяет сэкономить время подлета к соответствующей зоне по сравнению с методом картографирования в режиме бокового обзора, при котором необходимо выполнять разворот, сопровождаемый дополнительными временными затратами. Кроме того, при коррекции движения подлета к зоне бедствия, дальность до нее уменьшается, и увеличивается отношение сигнал/шум, а значит, обеспечивается и третье требование.

Возможность обеспечения высокого разрешения по азимуту и дальности в передней зоне обзора также является основной характеристикой при выполнении задач оперативного мониторинга, которую необходимо повышать при формировании радиолокационного изображения в передней зоне обзора бортовых радиолокационных станций. Этими доводами и обосновывается целесообразность выбора малогабаритных многопозиционных БРЛС к реализации бортовых систем оперативного мониторинга.

По этим причинам развитие теории комплексирования в радиолокационных многопозиционных бортовых системах, а также реализуемых на их базе способов оперативного мониторинга является актуальной задачей.

Современные требования к разрешающей способности радиолокационных кадров

Малогабаритные бортовые радиолокационные системы (МБРЛС), способные формировать радиолокационные кадры (РЛК) на основе метода радиолокационного синтеза апертуры (РСА) антенны, зарекомендовали себя как высокоточные системы, функционирующие в сложных погодных и сезонных условиях [3-4]. Современные требования, предъявляемые к МБРЛС оперативного мониторинга, с каждым годом возрастают.

При визуальном наблюдении высококачественного РЛК опытным оператором-дешифровщиком требуемая детальность изображения наземного объекта (НО) (разрешающая способность в метрах) для решения задач классификации и распознавания (с вероятностью 0,85) представлена в табл. 1. То есть существенное влияние на эффективность распознавания объектов на РЛК оказывает его разрешающая способность.

Так например известно, что при разрешении 2 м РЛК можно судить о принадлежности объекта к определенному классу, а при повышении качества РЛИ до 0,15 м эффективность решения задачи распознавания повышается в несколько раз [4-6].

Таким образом, задача по повышению процента верно распознанных НО может быть решена при разрешающей способности 1...0,3 м. Для достижения таких показателей предлагается осуществить процедуру повышения разрешающей способности РЛК земной поверхности при многочастотном следовании пачки зондирующих импульсов [7].

Данный подход реализуется за счет применения нескольких частот следования зондирующих импульсных пачек сигналов и специальной межпериодной обработки радиолокационных данных, что и позволяет повысить разрешающую способность РЛК.

Однако помимо повышения разрешения РЛК требуется рассмотреть особенности формирования видеопотока радиолокационных кадров для решения задач распознавания объектов на качественно новом уровне, а также за счет межкадровой обработки потока РЛК.

Особенности формирования видеопотока радиолокационных кадров

В отличие от практически мгновенной регистрации кадров в оптических малогабаритных бортовых системах,

Таблица 1 – Требования к разрешающей способности для распознавания НО на РЛК [5, 6]

Цель	Обнаружение	Распознавание класса	Распознавание типа	Детальное описание
Аэродром	60,0	4,5	3,0	0,30
ВПП	40,0	9,0	4,5	1,50
Самолёт	4,5	1,5	0,9	0,15
РЛС	3,0	0,9	0,3	0,15
САУ	0,9	0,6	0,15	0,10
Транспорт	1,5	0,6	0,3	0,10
КП	3,0	1,5	0,9	0,15
Склад	1,5	0,6	0,3	0,25
Группировка войск	6,0	2,1	1,2	0,30
Мост	6,0	4,5	1,5	0,90
ЖД-узел	30	15	6,0	1,50
Дорога	9,0	6,0	1,8	0,60
Морское судно	7,5	4,5	0,6	0,30
Подводная лодка	30	6,0	1,5	0,90

в МБРЛС требуется определенное время на формирование радиолокационного изображения высокого разрешения, то есть время на синтезирование полной апертуры антенны. В связи с этим поток РЛК формируется с меньшей частотой следования кадров в МБРЛС, чем аналогичный поток в малогабаритных оптико-локационных системах мониторинга земной поверхности. На сегодняшний день приемлемым для МБРЛС считается частота следования РЛК в потоке порядка 5 Гц и более, с разрешением РЛК не более 1 м как по азимутальной координате, так и по координате дальность [1, 2, 8, 9].

Однако существует сложность, которая заключается в том, что если РЛК формируется при получении радиолокационных данных на основе синтезирования полной апертуры, то частота следования кадров в потоке становится неприемлемо низкой. А также в случае формирования потока РЛК на основе радиолокационных данных от полной синтезированной апертуры требуются значительные вычислительные мощности, что не всегда возможно обеспечить на борту малогабаритных РЛС. Таким образом, для увеличения частоты кадров и снижения вычислительной нагрузки на МБРЛС предлагается использовать высокоскоростной способ формирования потока РЛК на основе разложения полной синтезированной апертуры на субапертуры с обновлением текущего РЛК каждый раз, когда формируются новые данные субапертуры.

Кроме того, для достижения указанных показателей при формировании потока в МБРЛС требуется, чтобы носитель осуществлял полет по круговой траектории, обеспечивая постоянный обзор одного заданного участка земной поверхности.

Таким образом, чтобы одновременно достичь требуемую приемлемую частоту следования кадров для формирования соответствующего потока и одновременно обеспечить высокое их разрешение, РЛК должны быть сформированы по данным от субапертур с их наложением друг на друга при движении носителя МБРЛС по круговой

траектории. Данные особенности следует учитывать при реализации классификации и распознавания НО в потоке радиолокационных кадров в ПРС БРЛС.

Для отображения динамики изменения объектов исследуемых территорий в реальном масштабе времени требуются дополнительные вычислительные затраты и особый подход к распределению ресурсов между компонентами вычислительной системы [2].

Классификация и распознавание наземных объектов в потоке радиолокационных кадров

Сегодня использование нейронных сетей (НС) для обнаружения и распознавания объектов является наиболее перспективным подходом для реализации систем с техническим зрением, так как может выполняться в автоматическом режиме работы. В связи с этим широкие возможности по реализации методов и алгоритмов автоматического распознавания и классификации объектов [10] открываются с внедрением НС технологий в теорию и технику разработки авиационных ПРС бортовых систем комплексной обработки потоков РЛК.

Нейронные технологии позволят создать алгоритмы и технические средства автоматического распознавания наземных объектов на РЛК видеопотока, в которых описание объектов и решающие процедуры распознавания будут реализованы в процессе обучения таких систем. Нейронные сети решают задачи распознавания, где в качестве входных данных используют РЛК потока.

Процесс классификации и распознавания НО (транспортные средства, дома, катера и т.д.), находящихся на РЛК подстилающей поверхности, целесообразно разделить на два этапа. Этап 1 включает выделение областей целеподобных объектов с их дальнейшим выделением на этой области обнаруженных НО (требуемого класса для дальнейшего распознавания) с отделением фона местности РЛК потока. Этап 2 содержит распознавание отделенных от фона местности НО на основе применения НС.

Классификация наземных объектов

Этап 1 включает следующую последовательность действий для классификации НО (их выделения) на РЛК потока данных.

- 1) Выделение областей целеподобных на РЛК потока данных по радиолокационным признакам.
- 2) Выделение радиоконтрастных элементов разрешения на РЛК подстилающей поверхности.
- 3) Сегментация близко расположенных, выделенных на предыдущем шаге, элементов разрешения РЛК с учётом радиолокационных методов селекции наземных целей² [7].
- 4) Определение пространства информационных признаков для классификации наземных объектов по их геометрическим, энергетическим, поляризационным и текстурным признакам с учетом разноракурсного наблюдения в многопозиционном режиме формирования РЛК в передней зоне обзора.
- 5) Комбинирование определенных на предыдущем шаге информационных признаков в статистику для классификации наземных объектов.

6) Определение достаточной статистики – из определенного минимального набора пространства информационных признаков с учетом их разделяющей способности и затрачиваемых вычислительных ресурсов для определения соответствующих критериев классификации НО.

7) Реализация алгоритма классификации НО на РЛК по определённым на предыдущем шаге критериям.

Кроме того, для выделенных НО на РЛК требуется провести дополнительный анализ для фильтрации стационарных радиоконтрастных объектов (зданий, мостов, насыпей и т.д.), не входящих в класс для распознавания на втором этапе.

В результате выделенные в класс НО помечаются и группируются в набор данных, служащий входным для НС. Отметим, что процесс классификации наземных объектов в значительной степени зависит от качества и скорости сегментации элементов разрешения РЛК.

Разработана новая методика высокоскоростной кластеризации пикселей, которая генерирует множество разбиений, что позволяет качественно осуществлять процесс сегментации и на ее основе обнаруживать и классифицировать распределенные НО на кадрах радиолокационных изображений различной сложности [11-13].

Распознавание наземных объектов

Для решения задачи распознавания НО (этап 2) с помощью сверточной нейронной сети (СНС) R-CNN выполнялся поиск значения ее весов и порогов, являющихся неизвестными параметрами [14,15]. Преимуществом использования СНС Faster R-CNN (regions with convolutional neural networks) для обнаружения и распознавания НО на радиолокационных изображениях является точность распознанного НО. Она дает возможность работать с частотой кадров 5 кадров в секунду на графическом процессоре и обеспечивает самую современную

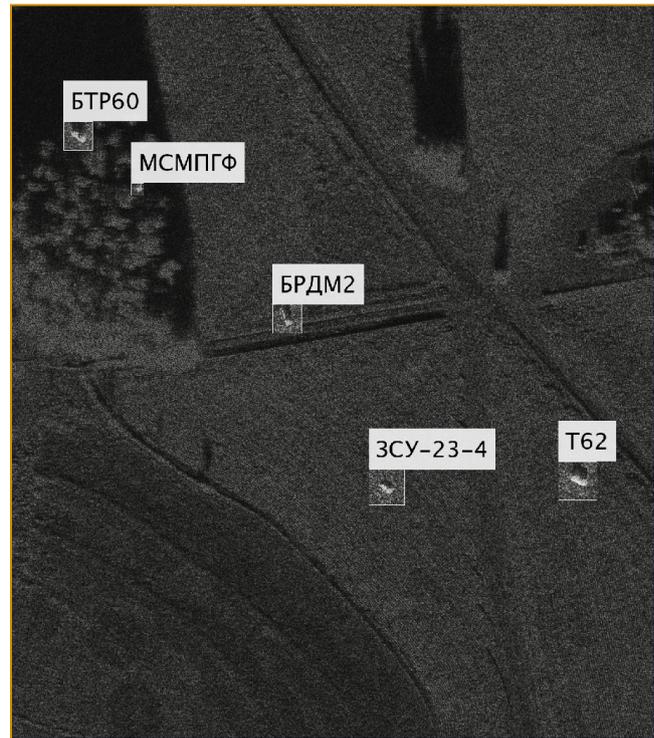


Рис. 1. Результаты распознавания НО на основе применения нейронной сети

точность обнаружения объектов, однако для объектов, размер которых сравним с размером пикселя на изображении, заявленная точность обнаружения не достигается [16]. Этот процесс представляет собой настройку модели многослойной структуры, реализуемой НС, к обучающим данным определенного на этапе 1 класса, имеющим известный идентификатор (автомобиль, катер, поезд, или другой наземный объект).

Таким образом, в качестве эталонов для обучения НС были выбраны небольшие фрагменты РЛК с НО и фоном. Затем проводилось предобучение НС. После обучения тестовые образцы вводятся в НС для извлечения признаков. Образцы делятся на две категории: образцы, содержащие наземные объекты, и образцы фона. Выделение объектов на РЛК осуществляется в сложных условиях фоно-целевой обстановки. После того, как НО был выделен, необходимо перейти к процессу распознавания в НС. Результаты работы НС представлены на рисунке.

Ошибки подобной системы распознавания определяются путем прогона всех имеющихся наблюдений и сравнения с реально выдаваемыми идентификационными реакциями, полученными при проведении экспериментов, с эталонными значениями, заданными на этапе обучения. Процесс обучения сети осуществляется путем последовательной минимизации ошибки ложно распознанных НО.

Основанные на нейронной сети алгоритмы показали перспективные результаты при решении задачи

² Патент № 2703996 С2 РФ, 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 АО "Концерн "Гранит-Электрон".

распознавания НО на РЛК. В этом примере применен подход, основанный на глубоком обучении для решения задачи распознавания НО.

В качестве параметров оценки качества работы НС были выбраны: доля корректно распознанных НО и площадь под кривой ошибок. При этом доля верно распознанных НО на изображении составляет порядка 93,8%.

Заключение

В ходе выполнения исследования получены следующие результаты: рассмотрены вопросы построения пространственно-распределенных систем бортового радиолокационного мониторинга, а также особенности формирования потока радиолокационных кадров. Определены требования разрешающей способности к РЛК, необходимые для реализации системы классификации и распознавания наземных объектов. Разработана двухэтапная методика классификации и распознавания наземных объектов на сформированных РЛК потока. В основе методики классификации и распознавания наземных объектов на РЛК потока реализованы процедура сегментации и работа НС, которая предполагает ее реализацию на основе обучения. Результатом разработки является система формирования и комплексной обработки видеок кадров в реальном времени для классификации и распознавания наземных объектов в ПРС БРЛС.

Список литературы

1. *Nenashev V.A., Shepeta A.P., Kryachko A.F.* Fusion radar and optical information in multiposition on-board location systems // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020, Saint-Petersburg. 2020. P. 9131451.
2. *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.
3. *Подоплекин Ю.Ф., Шенета Д.А., Ненашев В.А.* Моделирование входных сигналов бортовой РЛС, обусловленных отражениями зондирующего сигнала от подстилающих поверхностей земли и моря // Морской вестник. 2016. № 4(60). С. 69–71.
4. *Novel Radar Techniques and Applications: Real Aperture Array Radar Imaging Radar and Passive and Multistatic Radar.* 2017. eBooks.
5. *Школьный Л.А.* Радиолокационные комплексы воздушной разведки. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1985.
6. *Антонов И.К., Детков А.Н., Ницак Д.А., Тонких А.Н., Цветков О.Е.* Воздушная разведка. Автоматизированное дешифрирование радиолокационных изображений. Под ред. И.К. Антонова. М.: Радиотехника, 2021. 296 с.
7. *Ненашев В.А., Сенцов А.А.* Пространственно-распределенные системы радиолокационного и оптического мониторинга: монография. СПб: редакционно-издательский центр ГУАП, 2022. 191 с.
8. *He Z., Chen X., Yi T., He F., Dong Z., Zhang Y.* Moving Target Shadow Analysis and Detection for ViSAR Imagery // Remote Sensing. 2021; 13(15):3012.
9. *Ward K., Tough R., Watts S.* Sea Clutter: Scattering, the K distribution and radar performance // Electromagnetics and Radar. 2007. no. 17 (2), pp. 233–234.
10. *Ненашев В.А.* Особенности классификации подстилающих поверхностей земли по характеристикам эхо-сигналов в бортовых РЛС // Труды МАИ. 2021. № 118.
11. *Khanykov I.G., Nenashev V.A., Kharinov M.V.* Algebraic Multi-Layer Network: Key Concepts // Journal of Imaging. 2023; 9(7):146.
12. *Nenashev V.A., Khanykov I.G.* Formation of Fused Images of the Land Surface from Radar and Optical Images in Spatial Distributed On-Board Operational Monitoring Systems // Journal of Imaging. 2021. 7(12):251.
13. *Nenashev V.A., Kharinov M.V., Khanykov I.G.* A Model of Pixel and Superpixel Clustering for Object Detection // Journal of Imaging. 2022. 8. 274. pp. 1–26.
14. *Kumar, Durga Priya and Xiaoling Zhang.* Ship Detection Based on Faster R-CNN in SAR Imagery by Anchor Box Optimization // International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). 2019: 1–6.
15. *Qian Y., Liu Q., Zhu H., Fan H., Du B. and Liu S.* Mask R-CNN for Object Detection in Multitemporal SAR Images // 10th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp), Shanghai, China, 2019, pp. 1–4.
16. *Li J., Qu C., Shao J.* Ship detection in SAR images based on an improved faster R-CNN // SAR in Big Data Era: Models, Methods and Applications (BIGSAR DATA). – IEEE, 2017. pp. 1–6.

Ненашев Вадим Александрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств №23 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), заведующий лабораторией машинного обучения Инженерной школы ГУАП, *Ненашев Сергей Александрович* – младший научный сотрудник кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств №23 ГУАП, магистрант ГУАП.