

О построении интеллектуальной системы управления распределенными радиолокационными средствами для обнаружения объектов малоразмерной авиации в условиях плотной городской застройки*

А.А. Сенцов, М.Б. Сергеев, Е.К. Григорьев

Определены задачи исследования по своевременному обнаружению, распознаванию и классификации воздушных объектов, определению координат и направления движения в режиме реального времени, прогнозированию положения воздушного объекта, а также оптимальному разворачиванию распределенной системы с учетом профиля зданий, сооружений и объектов в контролируемой зоне, а также разработке перспективных модулированных радиосигналов в условиях возрастающего уровня естественных и искусственных помех на основе технологии множественного доступа с применением специальных квазиортогональных базисов. Представлены результаты научного исследования, включающие теоретические обоснования, результаты моделирования и натурных экспериментов по созданию интеллектуальной системы управления распределенными радиолокационными средствами для обнаружения объектов малоразмерной авиации в условиях плотной городской застройки, что является основой для реализации разработанной системы в промышленном варианте.

Ключевые слова: радиолокационная станция, комплексирование информации, интеллектуальная система, квазиортогональные базисы, шумоподобные сигналы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06029).

Введение

В настоящее время объекты малоразмерной авиации (ОМА) являются современным средством для проведения дистанционной фото- и видеосъемки. Несмотря на наличие Постановления Правительства Российской Федерации от 25.05.2019 №658 о необходимости регистрации беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлетной массой от 0.25 до 30 кг, средства регистрации их перемещения сегодня отсутствуют. Благодаря доступной цене и простоте освоения управления они могут рассматриваться как потенциально опасные объекты, проникающие в воздушное пространство над военными, секретными, социально значимыми объектами инфраструктуры (аэропорты, вокзалы, системы жизнеобеспечения, мосты) и частными владениями. При условии существования методов перехвата управления [1, 2] и способах противодействия им [3], всё большую актуальность принимают исследования, направленные на разработку средства обнаружения и распознавания ОМА, особенно в воздушном пространстве города [4–7].

Очевидно, что решать задачу обнаружения и сопровождения ОМА можно с использованием оптических средств за счет визуального контакта с обнаруженным объектом. Однако они имеют существенные недостатки, а именно:

— узкое поле зрения на больших дальностях;

— отсутствие возможности всепогодного и круглосуточного наблюдения.

Альтернативным средством является радиолокационная станция (РЛС), представляющая собой активное излучающее средство обзора пространства. Следует отметить, что применение различных по физическим принципам работы средств позволяет использовать в совокупности их преимущества и перекрывать недостатки [8, 9]. Тем не менее, основным средством обнаружения ОМА на дальностях, обеспечивающих возможность применения превентивных защитных мер, являются РЛС.

Целью работы являлась проработка основных решений, необходимых при создании системы управления распределенными радиолокационными средствами для обнаружения ОМА в условиях плотной городской застройки.

Для достижения указанной цели необходимо решение задач:



СЕНЦОВ
Антон Александрович
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения



СЕРГЕЕВ
Михаил Борисович
профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения



ГРИГОРЬЕВ
Евгений Константинович
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

- оптимального развертывания распределенной системы с учетом профиля зданий, сооружений и объектов в контролируемой зоне;
- своевременного обнаружения, распознавания и классификации воздушных объектов;
- определения координат и направления движения (составляющих векторов скорости) в режиме реального времени;
- прогнозирования положения воздушного объекта.

Моделирование радиолокационной обстановки распределенной системы РЛС

Схема формирования и отработки проектно-конструкторских решений радиолокационных средств показывает, что, по завершении расчетно-теоретического этапа, включающего параметрический синтез и анализ проектно-конструкторских решений, требуется практическое подтверждение технических вариантов исполнения, напрямую связанное с имитационным и полунатурным моделированием, стендовой отработкой и натурными испытаниями [10].

Применяемые процедуры опираются на методы математической статистики и регрессионного анализа, численные ме-

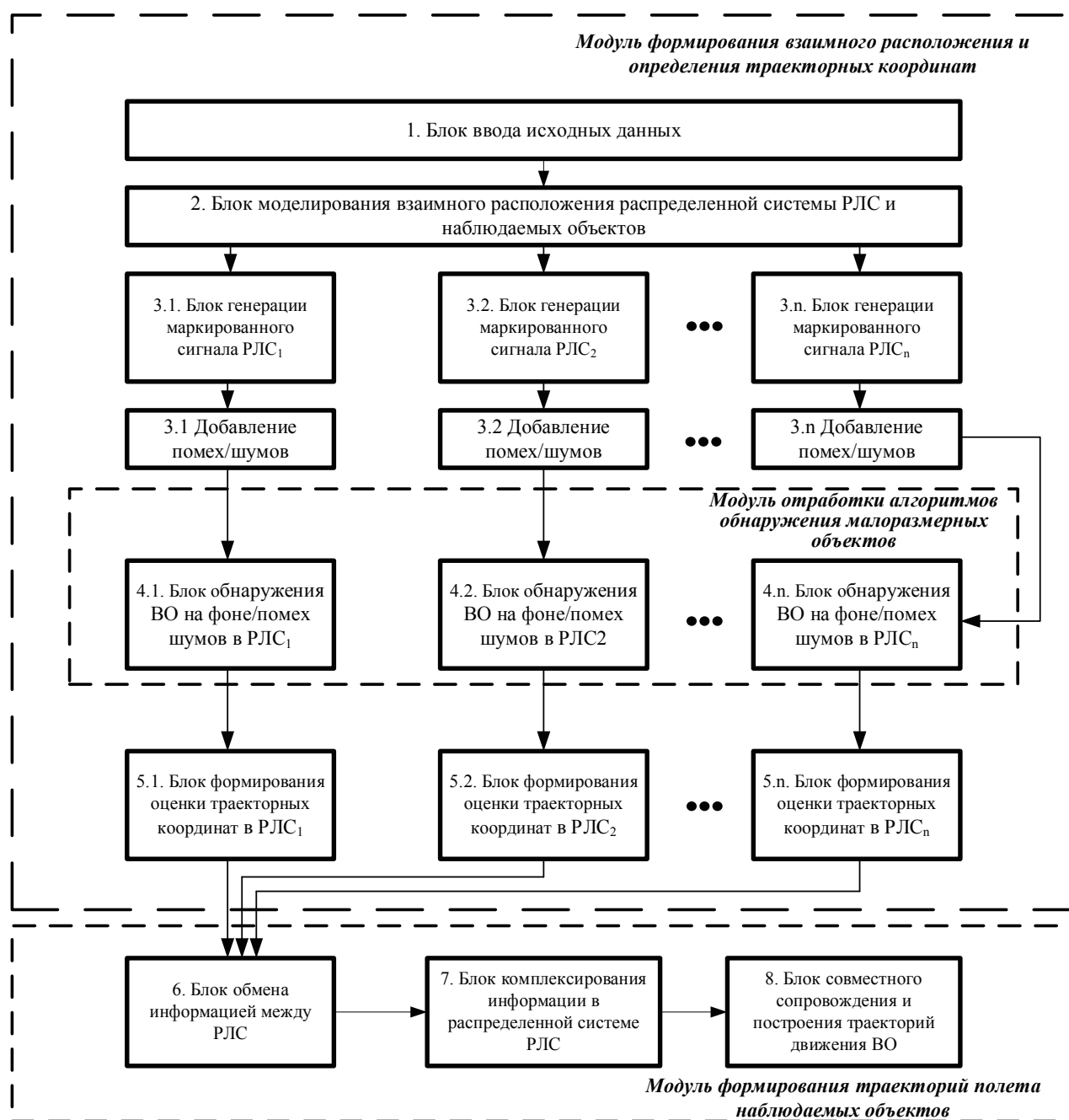


Рис. 1. Структурная схема программы для проведения имитационного моделирования.

тоды параметрической оптимизации, в основе которых лежат следующие допущения:

- возможность сравнения реакций модели и объекта;
- однородность и независимость проводимых опытов;
- математическая корректность задачи параметрической оптимизации;
- аналитическое задание границ допустимой области параметров.

В рамках проведенных исследований была разработана программа – имитатор радиолокационной обстановки интеллектуальной системы управления распределенной системы РЛС с модульной архитектурой. Структурная схема имитатора приведена на *рис. 1*.

Модель в случае режима «земля–воздух» для двухпозиционной системы автономных РЛС включает в себя множество объектов, а именно: переотражения от подстилающей поверхности, от воздушного объекта (ВО) естественного или искусственного происхождения, от статических объектов в зоне наблюдения и т. д. Кроме того, каждый объект имеет свои особенности и характеристики. Например, для ВО это вектор скорости и ускорения, ЭПР и др. [11].

Первый этап моделирования предполагает ввод исходных данных в соответствии с данными расчетно-теоретического этапа и результатами ранее проведенных натурных и полунатурных испытаний, поскольку возможность отдельно задавать параметры, например, каждой из РЛС, приближает их к реально существующим образцам.

В программе используются способы и алгоритмы обработки сигналов, разработанные для современных пространственно-распределенных систем воздушного мониторинга в режиме «земля–воздух», в блоках которой учитываются как сложные маршруты движения ВО, их отражающие свойства, так и положение и форма диаграмм направленности антенн автономных РЛС, влияние метеословий и т. п.

Моделирование работы каждого программного блока в отдельности с учетом функциональных особенностей и полученных на практике статистических данных позволяет качественно отладить разработанные алгоритмы и получить достоверные результаты моделирования, что, в свою очередь, обеспечивает качественную отладку применяемых алгоритмов комплексирования.

Программа, реализующая имитационную модель, позволяет обеспечивать завязку траекторий и принятие решения о дальнейшем сопровождении ВО распределенными РЛС. Отработка различных сценариев ускоряет развертывание системы за счет сокращения этапа полунатурных и натурных испытаний.

К реальным условиям функционирования модель приближают сформированные базы данных характеристик беспилотных летательных систем самолетного, вертолетного и мультикоптерного типов [11].

Кроме перечисленных возможностей, при проектировании и эксплуатации РЛС предусматривается учет влияния осадков и растительности при распространении радиоволн, а также явлений, связанных с эффектом замираний при рас-

пространении радиоволн, имеющих место в плотной городской застройке. В модели учитываются:

- дифракционное замирание в результате блокирования трассы наземными объектами;
- многолучевое распространение вследствие отражения от поверхностей;
- уменьшение избирательности по кроссполаризации (XPD) при многолучевости;
- искажение сигнала, обусловленное частотно-избирательными замираниями и запаздываниями [10–13].

Распознавание воздушных объектов и интеллектуализация системы

Несмотря на очевидное превосходство РЛС над оптическими системами наблюдения, для них существует проблема распознавания принадлежности принятого сигнала. Так, на экране оператора РЛС отметка от малоразмерного ВО сопоставима с отметкой от птицы и представляет собой «яркостное пятно». Применение аппаратно-программных средств выделения микродоплеровского эффекта в принятом радиолокационном сигнале позволяет определять по спектральному портрету обнаруженного ВО его принадлежность к естественному или искусственному типу.

На *рис. 2* представлены полученные с помощью РЛС спектральные портреты объектов искусственного происхождения и птиц. Анализ портретов показывает, что у техногенных объектов в спектральном портрете присутствуют боковые составляющие, причем их количество и амплитуда не являются постоянными величинами [14].

Однако обученная на большом наборе спектральных портретов нейронная сеть дает возможность автоматического распознавания обнаруживаемых ВО в системе РЛС.

Для создания интеллектуальной системы управления распределенными РЛС для обнаружения ОМА в условиях плотной городской застройки требуется обработка данных в ре-

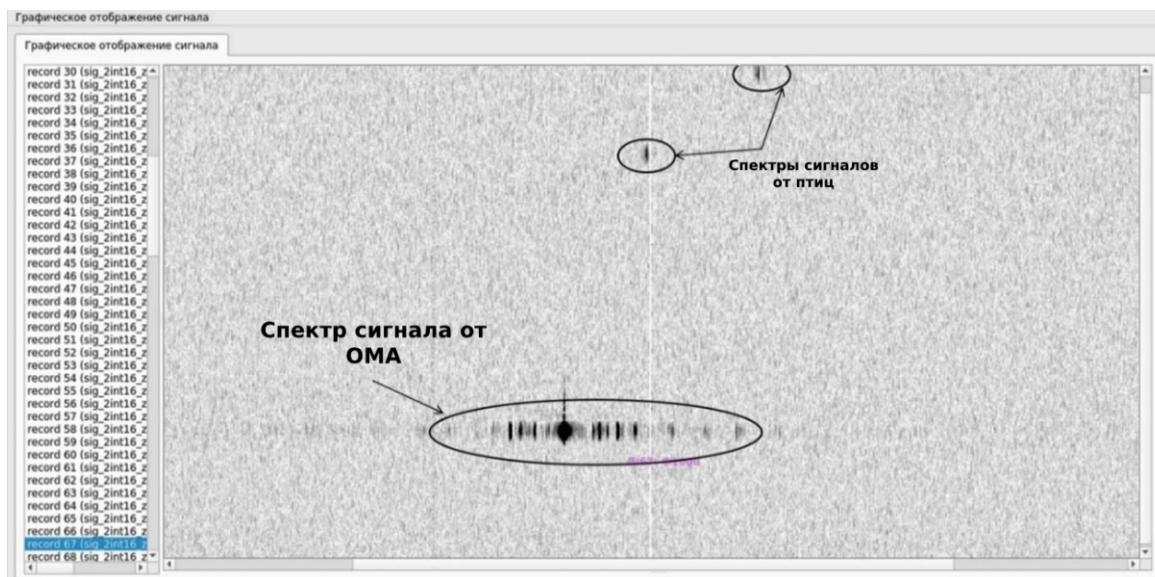


Рис. 2. Спектральные портреты воздушных объектов [14].

жиге, близком к реальному времени. В распределенной системе удаление между РЛС может достигать значительных расстояний, включающих препятствия в условиях плотной городской застройки. Это требует разработки защищенного беспроводного канала передачи данных. Для связи разнесенных в пространстве РЛС целесообразно использование совокупности ортогональных сигналов с хорошими корреляционными характеристиками, для обеспечения как требуемой степени влияния друг на друга, так и высокого показателя разрешения на фоне помех [15, 16].

При разработке системы исследованы методы построения персимметричных квазиортогональных матриц и кодовые последовательности на основе строк указанных матриц [17–19]. Исследование показало, что решение отойти от классического подхода, когда алфавит кодовой последовательности является целочисленным и симметричным, позволяет улучшить корреляционные свойства последних.

В качестве примера на рис. 3 показаны аperiodическая и периодическая автокорреляционные функции (АКФ) предложенных кодовых последовательностей. Первая получена из строки квазиортогональной матрицы с элементами $\{1, -b\}$, вторая – из m -последовательности. Длина каждой последовательности $N=15$.

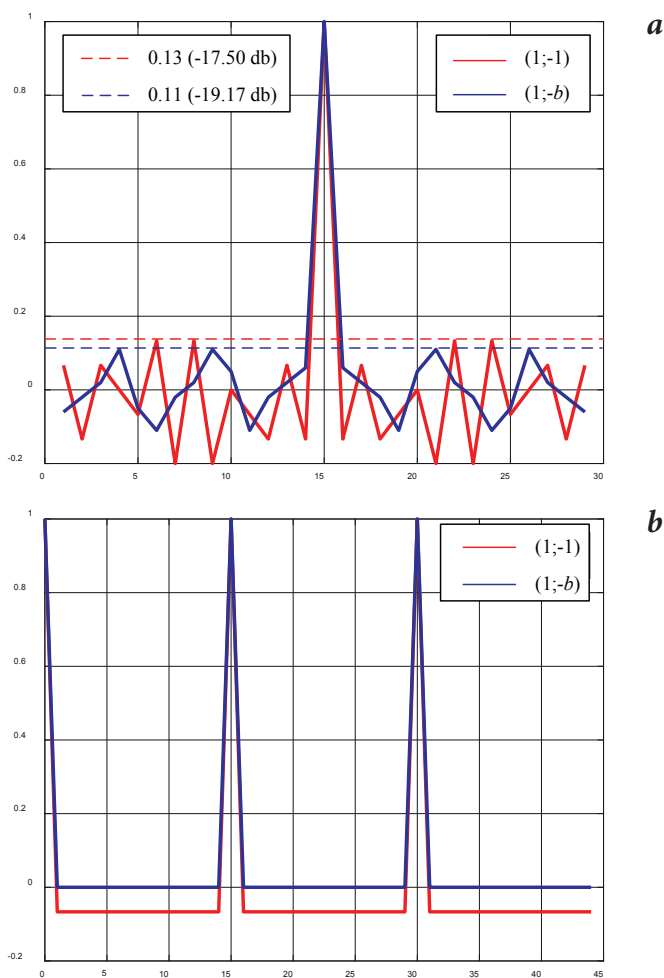


Рис. 3. Сравнение корреляционных характеристик известных и предлагаемых кодовых последовательностей: а – аperiodическая АКФ; б – периодическая АКФ.

Выигрыш в максимальном уровне бокового лепестка аperiodической АКФ в рассмотренном примере составляет 1.67 дБ. Предлагаемые последовательности обладают одноуровневой периодической АКФ, что при применении в качестве преамбул кадров в потоке данных обеспечивает их

лучшее выделение в условиях сложной электромагнитной обстановки города.

Выбор технологии для реализации РЛС распределенной системы направлен на минимизацию факторов, связанных с физическими принципами функционирования: искажения диаграммы направленности многоэлементной активной фазированной антенной решетки (АФАР) из-за температурных изменений; искажения диаграммы направленности плоской многоэлементной АФАР из-за взаимного влияния излучателей [20–23].

Одним из вариантов реализации РЛС распределенной системы являются экспериментальные образцы, построенные по технологии каскадируемых активных фазированных волноводно-щелевых антенных решеток [24].

Основные результаты проектирования распределенной системы РЛС

Проведенные в процессе проектирования исследования позволили проработать основные решения, необходимые при создании распределенной системы мобильных РЛС для обнаружения ОМА в условиях плотной городской застройки, а также решить ряд технических задач.

В частности, определены способы размещения в зоне плотной городской застройки мобильных РЛС на основе каскадируемых антенных секций с перестраиваемыми параметрами под особенности, связанные с размещением.

Разработаны методы формирования зондирующих сигналов РЛС и сигналов цифровых коммуникационных каналов, обеспечивающие их маркирование и возможность выделения в условиях действия естественных и искусственных помех.

Разработаны методы совмещения результатов обработки информации от разнородных источников в едином информационном формате для принятия решения интеллектуальной системой управления распределенными РЛС.

Разработан гибридный классификатор, обеспечивающий принятие решения о принадлежности обнаруживаемого объекта к одному из классов ВО – естественному или искусственному.

Предложены решения для обеспечения безопасности информационного обмена между постами РЛС и наземным пунктом управления за счет маскирования, сжатия и кодирования радиолокационных данных.

На основе накопленных статистических данных с помощью имитатора малоразмерной воздушной цели на базе ОМА разработаны и внедрены специализированные алгоритмы обработки радиолокационных данных:

- совмещения радиолокационных изображений с цифровой картой местности;
- выделения и учета микродоплеровского эффекта в принятом радиолокационном сигнале;
- гибридной классификации, включающей предварительную обработку (фильтрацию, выделение классификационных признаков, кластеризацию, аппроксимацию) и при-

нятие решения о принадлежности обнаруживаемого воздушного объекта к одному из классов;

- выделения и учета спектральных характеристик принятого радиолокационного сигнала на основе нейронной сети.

Заключение

Проведенные исследования относятся к перспективному направлению развития систем радиолокации, связанному с переходом к пространственно-распределенным их реализациям, в том числе на основе мобильных РЛС.

В отличие от традиционного подхода проработаны вопросы построения распределенных станций с опорой на технологии множественного доступа с применением специальных квазиортогональных базисов. Их применение позволит обеспечить высокие тактические характеристики РЛС: структурную скрытность, помехозащищенность, высокую разрешающую способность, обеспечиваемые совокупностью ортогональных сигналов с хорошими корреляционными свойствами.

В области синтеза, обработки и кодирования сигналов определились следующие противоречия. Во-первых, возрастающие требования к гарантированной передаче модулированных радиосигналов в условиях возрастающих уровней естественных и искусственных помех при неизменных подходах к формированию классических кодов. Во-вторых, обеспечение в радиоканале помехоустойчивого кодирования сигналов за счет ослабления требований к автокорреляционной функции с одновременным переходом к новому несимметричному представлению кодов.

В этой связи для проектируемой системы распределенных РЛС решена задача выбора конкретных типов сложных зондирующих сигналов при использовании нескольких разнесенных передающих и приемных антенн, объединенных в высокоскоростную сеть обработки и комплексирования информации.

Литература

1. **M. Hooper, Y. Tian, R. Zhou, B. Cao, A. Lauf, L. Watkins, W. Robinson, W. Alexis**
В Proc. 2016 IEEE Military Communications Conference (USA, Baltimore, 01–03 November, 2016), USA, Baltimore, 2016, pp. 1213–1218.
DOI: 10.1109/MILCOM.2016.7795496.
2. **Э.А. Аджуханов, О.В. Николаев**
Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей», 2021, 2(37), 35.
DOI: 10.38013/2542-0542-2021-2-35-41.
3. **С.И. Макаренко**
Противодействие беспилотным летательным аппаратам, РФ, Санкт-Петербург, Научное издание, 2020, 204 с.
4. **J. Pyrgies**
J. Airline & Airport Manag., 2019, 9(2), 63. DOI: 10.3926/jairm.127.
5. **S. Park, H. Kim, S. Lee, H. Joo, H. Kim**
IEEE Access, 2021, 9, 42635. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
6. **С.И. Макаренко, А.В. Тимошенко, А.С. Васильченко**
Системы управления, связи и безопасности, 2020, №1, 109.
DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.
7. **E. Martins, E. Faith, K. Chethan, O. Ozgur, G. Ismail**
В Proc. 2019 IEEE Aerospace Conference, (USA, Big Sky, 02–09 March, 2019), USA, Big Sky, 2019, pp. 1–13.
DOI: 10.1109/AERO.2019.8741970.
8. **C. Huang, I. Petrunin, A. Tsourdos**
В Proc. 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), (Italy, Milan, 19–21 June, 2023), Italy, Milan, 2023, pp. 395–400.
DOI: 10.1109/MetroAeroSpace57412.2023.10189934.
9. **G. Danapal, C. Mayr, A. Kariminezhad, D. Vriesmann, A. Zimmer**
В Proc. 2022 Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications (SDF), (Germany, Bonn, 12–14 October, 2022), Germany, Bonn, 2022, pp. 1–6.
DOI: 10.1109/SDF55338.2022.9931946.
10. **А.А. Турчак, А.Н. Шестун, А.А. Сенцов**
Формализация и оптимизация жизненного цикла создания бортовых радиоэлектронных комплексов, под ред. Ю.М. Смирнова, РФ, Санкт-Петербург, ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021, 294 с.
11. **М.Б. Сергеев, А.А. Сенцов, Е.К. Григорьев, С.А. Ненашев**
Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2020, 8(3), 1.
DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.038.
12. **А.А. Сенцов, В.Б. Поляков, Г.Р. Иванова**
В Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах, под ред. Е.Д. Соложенцева, В.В. Карасева, РФ, Санкт-Петербург, ГУАП, 2020, с. 109–114.
13. **J. Wang, Y. Shi, C. Yang, S. Ji, H. Su**
Radio Sci., 2020, 55(10), 1. DOI: 10.1029/2019RS007048.
14. **И.И. Петров, В.П. Шкодырев, А.А. Сенцов, С.А. Иванов**
Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт, 2022, 16(3), 4.
DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-3-4-10.
15. **Радиолокационные системы авиационно-комического мониторинга земной поверхности и воздушного пространства**, под ред. В.С. Вербы, Б.Г. Татарского, РФ, Москва, Радиотехника, 2014, 576 с.
16. **Novel Radar Techniques and Applications. Vol 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar**, Ed. R. Klemm, UK, London, Scitech Publishing, 2017, 952 pp.
17. **Е.К. Григорьев, В.А. Ненашев, А.М. Сергеев, Е.В. Самохина**
Телекоммуникации, 2020, №10, 27.
18. **В.А. Ненашев, А.М. Сергеев, Е.А. Капранова**
Информационно-управляющие системы, 2020, 4(95), 9.
DOI: 10.31799/1684-8853-2018-4-9-14.
19. **А.М. Сергеев**
Телекоммуникации, 2022, №9, 28.
DOI: 10.31044/1684-2588-2022-0-9-28-33.
20. **В.И. Тепликова, А.А. Сенцов, В.А. Ненашев, В.Б. Поляков**
Труды МАИ, 2022, №125, 1.
DOI: 10.34759/trd-2022-125-17.
21. **В.И. Лапшин, Г.В. Зеленикина, И.В. Трусилова**
Антенны, 2021, №5(273), 65.
DOI: 10.18127/j03209601-202105-07.
22. **И.В. Чернова, А.С. Тодошева**
Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт, 2018, 12(8), 27.
DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10128.
23. **А.М. Голиков, Н.И. Воронцов**
В Сб. Тез. докл. Всерос. научн. конф. «Шарыгинские чтения» (РФ, Томск, 29 сентября – 01 октября, 2021), РФ, Томск, Изд. ТУСУР, 2021, с. 167–173.
24. **I.V. Tokarevsky, A.A. Sentsov, M.B. Sergeev**
В Proc. XXIV International conference «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (WECONF-2022), (RF, Saint-Petersburg, 30 May – 03 June, 2022), RF, Saint Petersburg, 2022, pp. 1–4.
DOI: 10.1109/WECONF55058.2022.9803393.

English

On the Construction of an Intelligent Control System for Distributed Radar Facilities for Detecting Objects of Small-Sized Aviation in Dense Urban Areas*

Anton A. Sentsov

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67 let. A Bolshaya Morskaya Str., Saint Petersburg, 190000, Russia
toxx@list.ru

Mikhail B. Sergeev

Professor,
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67 let. A Bolshaya Morskaya Str., Saint Petersburg, 190000, Russia
mbse@mail.ru

Evgeniy K. Grigoriev

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67 let. A Bolshaya Morskaya Str., Saint Petersburg, 190000, Russia
grig.evkg@gmail.com

Abstract

The tasks of research on timely detection, recognition and classification of aerial objects, determination of coordinates and direction of movement in real time, prediction of the position of an aerial object, as well as optimal deployment of a distributed system taking into account the profile of buildings, structures and objects in the controlled area, as well as the development of promising modulated radio signals in conditions of increasing levels of natural and artificial interference are determined based on multiple access technology using special quasi-orthogonal bases. The results of the scientific study are presented, including theoretical justifications, results of modeling and field experiments on the creation of an intelligent control system for distributed radar facilities for detecting objects of small-sized aviation in dense urban areas, which is the basis for the implementation of the developed system in an industrial version.

Keywords: radar, data fusion, intelligent system, quasi-orthogonal basis, noise-like signals.

**The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06029).*

Images & Tables

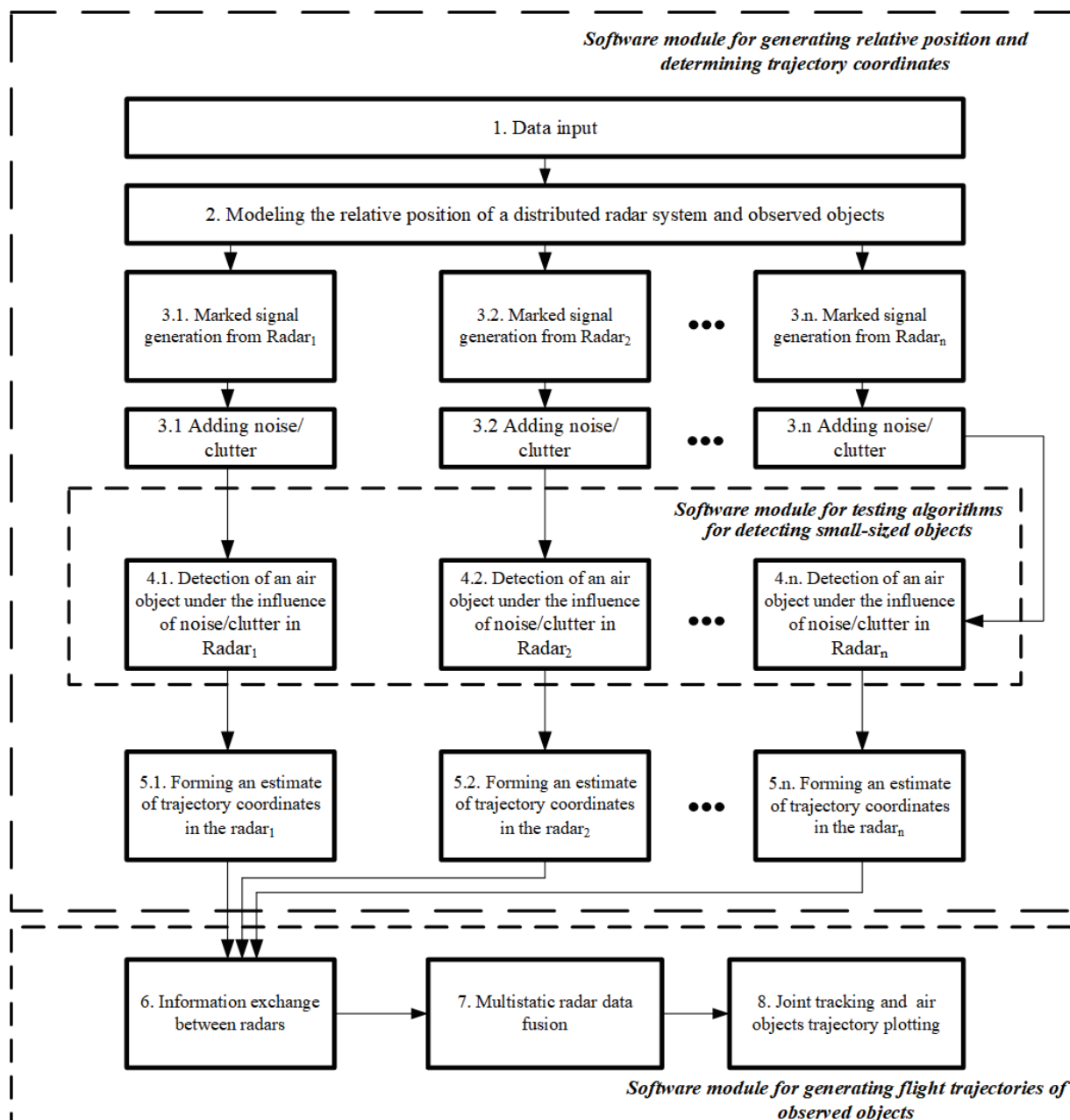


Fig. 1. Simulation modeling program block diagram.

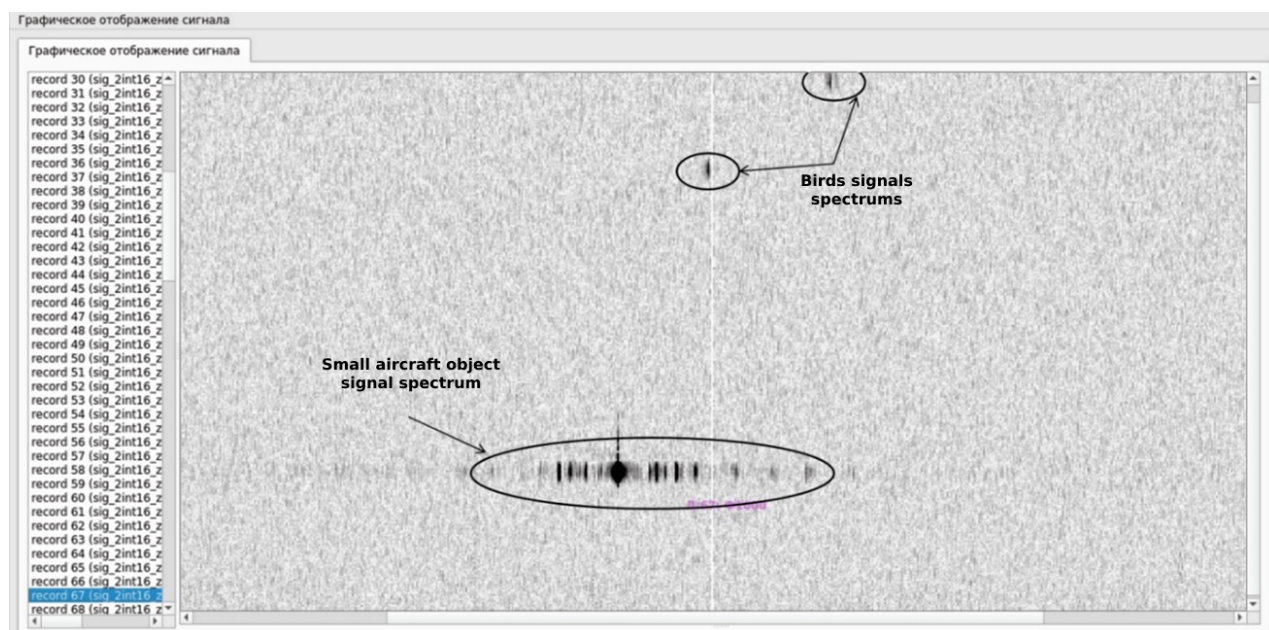


Fig. 2. Spectrum portraits of air objects [14].

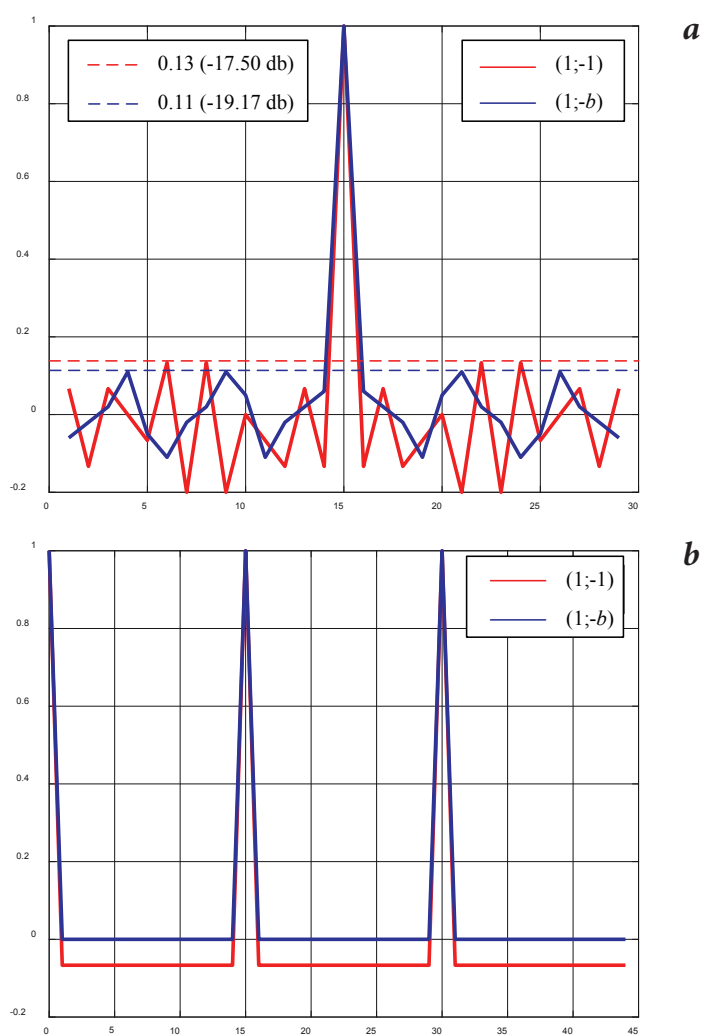


Fig. 3. Comparison of correlation characteristics of well-known and proposed code sequences: a – aperiodic autocorrelation function; b – periodic autocorrelation function.

References

1. M. Hooper, Y. Tian, R. Zhou, B. Cao, A. Lauf, L. Watkins, W. Robinson, W. Alexis
In Proc. 2016 IEEE Military Communications Conference (USA, Baltimore, 01–03 November, 2016), USA, Baltimore, 2016, pp. 1213–1218. DOI: 10.1109/MILCOM.2016.7795496.
2. E.A. Adzhakhunov, O.V. Nikolaev
J. "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation [Vestnik kontserna VKO "Almaz-Antey"], 2021, 2(37), 35 (in Russian). DOI: 10.38013/2542-0542-2021-2-35-41.
3. S.I. Makarenko
Countering Unmanned Aerial Vehicles [Protivodestvie bespilotnym letatel'nyim apparatam], RF, Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii, 2020, 204 pp. (in Russian).
4. J. Pyrgies
J. Airline & Airport Manag., 2019, 9(2), 63. DOI: 10.3926/jairm.127.
5. S. Park, H. Kim, S. Lee, H. Joo, H. Kim
IEEE Access, 2021, 9, 42635. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
6. S.I. Makarenko, A.V. Timoshenko, A.S. Vasilchenko
Systems of Control, Communication and Security [Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti], 2020, №1, 109 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.
7. E. Martins, E. Faith, K. Chethan, O. Ozgur, G. Ismail
In Proc. 2019 IEEE Aerospace Conference, (USA, Big Sky, 02–09 March, 2019), USA, Big Sky, 2019, pp. 1–13. DOI: 10.1109/AERO.2019.8741970.
8. C. Huang, I. Petrunin, A. Tsourdos
In Proc. 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), (Italy, Milan, 19–21 June, 2023), Italy, Milan, 2023, pp. 395–400. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace57412.2023.10189934.
9. G. Danapal, C. Mayr, A. Kariminezhad, D. Vriesmann, A. Zimmer
In Proc. 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), (Italy, Milan, 19–21 June, 2023), Italy, Milan, 2023, pp. 395–400. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace57412.2023.10189934.
10. A.A. Turchak, A.N. Shestun, A.A. Sentsov
Formalization and Optimization of the Life Cycle of Creating On-Board Radio-Electronic Systems [Formalizatsiya i optimizatsiya zhiznennogo tsikla sozdaniya bortovykh radioelektronnykh kompleksov], Ed. U.M. Smirnov, RF, Saint Petersburg, POLYTECH-PRESS, 2021, 294 pp. (in Russian).
11. M.B. Sergeev, A.A. Sentsov, E.K. Grigoriev, S.A. Nenashev
Modeling, Optimization and Information Technology [Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii], 2020, 8(3), 1 (in Russian). DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.038.
12. A.A. Sentsov, V.B. Polyakov, G.R. Ivanova
In Modeling and Analysis of Security and Risk in Complex Systems [Modelirovanie i Analiz Bezopasnosti i Riska v Slozhnykh Sistemakh], Eds E.D. Solozhenceva and V.V. Karasev, RF, Saint Petersburg, SUAI, 2020, pp. 109–114 (in Russian).
13. J. Wang, Y. Shi, C. Yang, S. Ji, H. Su
Radio Sci., 2020, 55(10), 1. DOI: 10.1029/2019RS007048.
14. I.I. Petrov, V.P. Shkodyrev, A.A. Sentsov, S.A. Ivanov
T-Comm, 2022, 16(3), 4 (in Russian). DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-3-4-10.
15. Radar Systems for Aerospace Monitoring of the Earth's Surface and Airspace [Radiolokatsionnye sistemy aviatsionno-kosmicheskogo monitoringa zemnoy poverkhnosti i vozdušnogo prostranstva], Eds V.S. Verba and B.G. Tatarsky, RF, Moscow, Radiotekhnika, 2014, 576 pp. (in Russian).
16. Novel Radar Techniques and Applications. Vol 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar, Ed. R. Klemm, UK, London, Scitech Publishing, 2017, 952 pp.
17. E.K. Grigoriev, V.A. Nenashev, A.M. Sergeev, E.V. Samohina
Telecommunications [Telekommunikatsii], 2020, №10, 27 (in Russian).
18. V.A. Nenashev, A.M. Sergeev, E.A. Kapranova
Information and Control Systems [Informatsionno-upravliaiustchie sistemy], 2020, 4(95), 9 (in Russian). DOI: 10.31799/1684-8853-2018-4-9-14.
19. A.M. Sergeev
Telecommunications [Telekommunikatsii], 2022, 9, 28 (in Russian). DOI: 10.31044/1684-2588-2022-0-9-28-33.
20. V.I. Teplikova, A.A. Sentsov, V.A. Nenashev, V.B. Polyakov
Trudy MAI, 2022, №125, 1 (in Russian). DOI: 10.34759/trd-2022-125-17.
21. V.I. Lapshin, G.V. Zelepukina, I.V. Trusilova
J. Antennas [Antenny], 2021, №5(273), 65 (in Russian). DOI: 10.18127/j03209601-202105-07.
22. I.V. Chernova, A.S. Todosheva
T-Comm, 2018, 12(8), 27 (in Russian). DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10128.
23. A.M. Golikov, N.I. Voroncov
In Proc. All-Russian Conf. «Sharygin Readings» [Tezisy dokl. Vseros. konf. «Sharyginskie chteniya»] (RF, Tomsk, 29 September – 01 October, 2021), RF, Tomsk, TUSUR University Publ., 2021, pp. 167 (in Russian).
24. I.V. Tokarevsky, A.A. Sentsov, M.B. Sergeev
In Proc. XXIV International conference «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (WECONF-2022), (RF, Saint-Petersburg, 30 May – 03 June, 2022), RF, Saint Petersburg, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF55058.2022.9803393.