

ՀՀ ԳԱՊ ԻՆՖՈՐՄԱՏԻԿԱՅԻ ԵՎ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐԻ
ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Կիրակոսյան Լիլիա Հայկի

**Ռադիոագղանշանների հայտնաբերման, դասակարգման և
խլացման համակարգի մշակում**

Ե.13.04 - «Հաշվողական մեքենաների, համալիրների, համակարգերի և
ցանցերի մաթեմատիկական և ծրագրային ապահովում»
մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՄԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ - 2026

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ НАН РА

Киракосян Лилия Айковна

Разработка системы обнаружения, классификации и подавления радиосигналов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.13.04- «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин,
комплексов, систем и сетей»

ЕРЕВАН - 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ռուս-Հայկական
Համալսարանում:

Գիտական ղեկավար՝ Տեխ. գիտ. դոկ. Վ.Հ. Ավետիսյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Առաջատար կազմակերպություն՝

Պաշտպանությունը կայանալու է _____ ՀՀ ԳԱԱ
Ինֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտում
գործող 037 մասնագիտական խորհրդում:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ ԻԱԳԻ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է _____

Մասնագիտական խորհրդի գիտական
քարտուղար Ֆիզ.մաթ.գիտ.դոկտոր՝

Тема диссертации утверждена Российско-Армянским университетом.

Научный руководитель: доктор технических наук В. Г. Аветисян

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится _____ на заседании
специализированного совета 037, действующего при Институте проблем информатики и
автоматизации Национальной академии наук Республики Армения.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем информатики и
автоматизации Национальной академии наук Республики Армения.

Автореферат разослан _____.

Ученый секретарь
специализированного совета,

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Функционирование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) осуществляется в сложной электромагнитной обстановке. В этих условиях особую актуальность приобретают задачи мониторинга радиочастотного спектра, включающие обнаружение, классификацию, локализацию и радиопротиводействие в диапазоне 400 МГц - 6 ГГц. В указанном диапазоне сосредоточена основная часть сигналов современных беспроводных систем, включая сети сотовой связи, локальные беспроводные сети, устройства Интернета вещей, а также каналы управления БПЛА.

Традиционные аппаратно реализованные радиосистемы функционируют в фиксированных диапазонах частот и поддерживают ограниченный набор протоколов связи. Такие системы не обладают достаточной гибкостью для адаптации к изменяющимся условиям радиочастотной обстановки. Кроме того, их применение в составе наземных комплексов ограничено фиксированной точкой наблюдения, что не обеспечивает устойчивой радиовидимости источников излучения в условиях городской застройки и сложного рельефа, а также затрудняет решение задач пространственной локализации радиоизлучений. В результате снижается эффективность мониторинга радиочастотного спектра.

Размещение системы радиомониторинга на борту БПЛА позволяет устранить указанные ограничения за счет обеспечения воздушной радиовидимости и возможности оперативного изменения точки наблюдения, что повышает эффективность обнаружения и обеспечивает возможность пространственной локализации источников радиоизлучения. Однако размещение на борту БПЛА приводит к ряду ограничений связанных с требованиями по массе, габаритам и энергопотреблению.

Для реализации полноценной бортовой системы обнаружения, классификации, локализации и передачи данных необходимо совместить все указанные радиофункции на единой аппаратно-программной платформе, что приводит к возникновению ряда научно-технических проблем. Технология программно-определяемого радио (ПОР) позволяет преодолеть указанные ограничения за счет программной реконфигурации радиотракта. Однако существующие решения на ее основе ориентированы преимущественно на стационарные наземные комплексы и, как правило, ограничиваются задачами обнаружения и классификации сигналов. При этом отсутствует полноценная интеграция подсистем связи, локализации и подавления в рамках единой мобильной платформы связанной с наземной станцией обеспечивающей подавления несанкционированных радиоизлучений.

Таким образом, разработка полноценной, компактной и энергоэффективной бортовой системы, обеспечивающей обнаружение, классификацию, локализацию и передачу данных на наземную станцию с последующей возможностью радиопротиводействия, является актуальной научно-технической задачей.

Целью диссертационной работы является разработка комплексной мобильной системы радиомониторинга и радиопротиводействия на основе единой ПОР-платформы, в которой бортовая система обеспечивает обнаружение, классификацию, локализацию

радиосигналов и передачу данных на наземную станцию, осуществляющую их обработку и последующее подавление несанкционированных радиоизлучений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. разработать и реализовать метод адаптивного энергетического обнаружения радиосигналов с динамическим порогом для работы в условиях нестационарной шумовой обстановки и ограниченных вычислительных ресурсов.
2. разработать и реализовать программный модуль классификации радиосигналов работающий в реальном времени на основе бинарных спектрограмм с использованием усеченной архитектуры нейронной сети для обеспечения работы в условиях ограниченных вычислительных ресурсов бортовой платформы;
3. разработать и реализовать метод локализации источников радиоизлучения с использованием одного приемника на движущейся бортовой ПОР-платформе;
4. разработать и реализовать интегрированную подсистемы помехоустойчивой связи на основе ПОР, обеспечивающей передачу телеметрии и видеоданных;
5. разработать и реализовать метод протоколно-ориентированного многотонального сканирующего подавления радиоканалов управления БПЛА с минимизацией энергопотребления;
6. интеграция разработанных модулей в единую систему на основе ПОР и проведение ее экспериментальной верификации в лабораторных и реальных условиях.

Объектом исследования является программно-аппаратная система радиочастотного мониторинга и связи беспилотных летательных аппаратов на основе программно-определяемого радио.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы обработки радиосигналов, включая обнаружение, классификацию, локализацию и подавление, а также методы организации помехоустойчивой связи в условиях ограниченных вычислительных ресурсов ПОР-платформ.

Методы исследования

В работе использованы методы цифровой обработки сигналов, спектрального анализа и статистического обнаружения сигналов, методы машинного обучения на основе сверточных нейронных сетей, а также методы байесовской фильтрации, включая фильтр частиц.

Положения, выносимые на защиту, и научная новизна

В диссертации получены следующие новые результаты, которые выносятся на защиту:

1. Предложен метод адаптивного энергетического обнаружения радиосигналов с динамическим порогом, формируемым на основе скользящей оценки уровня шума, обеспечивающий повышение устойчивости обнаружения при низких отношениях сигнал/шум работающей в условиях ограниченных вычислительных ресурсов бортовых платформ.
2. Разработан метод классификации радиосигналов работающий в реальном времени на основе усеченной нейросетевой архитектуры и бинарного

представления спектрограмм, обеспечивающий работоспособность в условиях ограниченных вычислительных ресурсов бортовых платформ.

3. Предложен метод локализации источников радиоизлучения с использованием одного ПОР-приемника на движущейся бортовой платформе, основанный на совместной обработке последовательных измерений уровня принимаемого сигнала и данных о перемещении платформы.
4. Разработан метод протоколно-ориентированного многотонального сканирующего подавления радиосигналов, использующий результаты обнаружения и классификации, полученные на бортовой системе БПЛА.
5. Разработана двухкомпонентная архитектура мобильной системы радиомониторинга и радиопротиводействия на основе единой ПОР-платформы, в которой воздушная платформа обеспечивает обнаружение, классификацию, локализацию и передачу данных, а наземная станция обработку полученной информации и последующее подавление радиосигналов.

Теоретическая значимость работы заключается в предложенной двухкомпонентной мобильной и энергоэффективной архитектуре обеспечивающей обнаружение, классификацию, локализацию и передачу данных на наземную станцию с последующим подавлением радиосигналов. Кроме этого предложен модел протоколно-ориентированного подавления, описывающая зависимость эффективности воздействия от параметров помехового сигнала и характеристик сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). А также установлено, что при классификации радиосигналов по бинарным спектрограммам глубина остаточной нейросетевой архитектуры не является определяющим фактором качества распознавания, что обосновывает возможность применения компактных моделей в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Практическая значимость работы заключается в разработке двухкомпонентной мобильной системы радиомониторинга и радиопротиводействия на основе ПОР, обеспечивающей обнаружение, классификацию, локализацию и подавление радиосигналов в режиме реального времени. Система реализована в виде программно-аппаратного комплекса на базе ПОР-платформы BladeRF 2.0 и вычислительной платформы NVIDIA Jetson Orin Nano, интегрирована с интерфейсом QGroundControl и включает подсистему помехоустойчивой связи на основе технологий LoRa и DVB-T. Работоспособность системы подтверждена лабораторными и полевыми испытаниями.

Разработанная система может использоваться в мобильных комплексах радиочастотного мониторинга, контроля радиочастотной обстановки и противодействия беспилотным летательным аппаратам.

Кроме того, сформирован и размечен набор данных, содержащий 15,719 бинарную спектрограмму семи классов радиосигналов, предназначенный для обучения, тестирования и сравнительной оценки моделей машинного обучения для классификации радиосигналов.

Гранты и контракты

Работа выполнена при поддержке гранта Комитета по науке Республики Армения 23AA-1B009 «Разработка системы обнаружения, классификации и подавления радиосигналов» (2023).

Отдельные исследования, представленные в диссертации, выполнены в рамках научных проектов № РSQU-ГU-2021/2-1, 24DP-1B006 «Разработка системы обнаружения, классификации и картирования радиосигналов, устанавливаемой на БПЛА» (2024) и 25DP-1B005 «Система контроля и управления роем FPV-дронов» (2025).

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы докладывались на 11 международных и 2 республиканских научных конференциях, семинарах и выставках в период 2023-2026 гг.

Среди них:

- Конкурс «Наvq» (Армения, 17 сентября 2023 г.), направление «Доставка полезной нагрузки с использованием БПЛА», II место.
- Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, РФ, 12 апреля 2024 г.), доклад по методам обнаружения и классификации радиосигналов.
- 17-я Международная ежегодная научная конференция Российско-Армянского университета (Ереван, РА, 16 апреля 2024 г.), доклад по методам спектрального анализа радиосигналов.
- Семинар ООН по применению ГНСС (Манила, Филиппины, 24 апреля 2024 г.), доклад по построению картографических моделей на основе данных БПЛА.
- WCIT Expo (Ереван, РА, 6 октября 2024 г.), демонстрация разработанной системы БПЛА.
- DevFest Expo (Ереван, РА, 20 октября 2024 г.), презентация системы беспилотных технологий.
- AMADEE-24 Science Workshop (Зальцбург, Австрия, 29 ноября 2024 г.), участие в научном семинаре по автономным системам.
- 18-я Международная конференция Российско-Армянского университета (Ереван, РА, 6 декабря 2024 г.), доклад по методам многотонального подавления радиосигналов.
- Семинар ООН по ГНСС и космическим технологиям (Испания, онлайн, 19 декабря 2024 г.), доклад по задачам локализации с использованием БПЛА.
- EDA Connect 2025 (Ереван, РА, 13 марта 2025 г.), доклад по FPGA-ориентированным ПОР-платформам.
- Иванниковские чтения 2025 (онлайн, 26 июня 2025 г.), доклад по методам классификации радиосигналов на основе спектрограмм.
- 19-я Международная конференция Российско-Армянского университета (Ереван, РА, 4 декабря 2025 г.), доклад по системам обнаружения и подавления радиоканалов БПЛА.
- Иванниковские чтения 2026 (Москва, РФ, 29 мая 2026 г.), доклад по методам классификации радиосигналов в реальном времени.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных работах [1-4], опубликованных в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РА.

Работа [3] индексируется в Scopus, остальные работы [1], [2] и [4] - в национальной научной базе данных Армении.

Личный вклад

Результаты, выносимые на защиту, получены лично автором или при его непосредственном участии.

В работе [1] автор разработала метод протоколно-ориентированного многотонального подавления радиосигналов и выполнила экспериментальную оценку его эффективности при воздействии на сигналы с ППРЧ в условиях ПОР-платформы.

В работе [2] автор разработала архитектуру интегрированной системы радиомониторинга на базе ПОР, реализовала алгоритмы классификации радиосигналов и модуль многоканального подавления, а также провела экспериментальные исследования в реальном радиоэфире.

В работе [3] автор разработала метод классификации спектрограмм радиосигналов в реальном времени, для исследования которого был сформирован и размечен соответствующий датасет.

В работе [4] автор реализовала дуплексный канал связи на основе технологии LoRa на платформе BladeRF 2.0 и провела летные испытания, подтвердившие устойчивость связи.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 114 страниц, включая 21 рисунок и 25 таблиц. Список литературы содержит 117 наименований.

В первой главе приводится обзор работ, имеющих отношение к теме диссертации. Рассматриваются современные методы обнаружения, классификации, локализации и подавления радиосигналов, а также организации помехоустойчивой связи применительно к бортовым платформам БПЛА.

В разделе 1.1 формируется контекст предметной области и обосновывается выбор целевых классов сигналов. Систематизированы радиосигналы диапазона 400 МГц - 6 ГГц (Wi-Fi, сотовые сети, Bluetooth, LoRa, каналы управления БПЛА с ППРЧ, видеоканалы FPV), приведены их диапазоны, виды модуляции и полосы. Обосновано применение технологии ПОР как основы построения адаптивной системы радиомониторинга и сформулированы ограничения класса SWaP, определяющие требования к массе, габаритам и энергопотреблению бортовой платформы.

В разделе 1.2 рассмотрены методы и системы обнаружения радиосигналов. Задача формализована как проверка двух статистических гипотез с метриками вероятности правильного обнаружения P_d и вероятности ложной тревоги P_{fa} . Показано, что энергетическое обнаружение обладает линейной сложностью, но неустойчиво к нестационарному шуму и ограничено порогом чувствительности; согласованная фильтрация требует априорного знания сигнала; циклостационарный анализ и методы глубокого обучения обеспечивают высокую чувствительность при низком ОСШ, но имеют

сложность и время инференса, несовместимые с работой в реальном времени на бортовом вычислителе. Сделан вывод об устойчивом компромиссе между чувствительностью и вычислительной стоимостью, не разрешенном существующими решениями в условиях бортового размещения.

В разделе 1.3 рассмотрены методы классификации радиосигналов. Установлено, что классические методы на основе статистических признаков и опорных векторов требуют ручного проектирования признаков и слабо обобщаются, а архитектуры глубокого¹ обучения обеспечивают точность 85-98 %, но либо избыточно параметризованы для бортового применения (ResNet-50: 25,6 млн параметров, время инференса 80-120 мс), либо зависят от централизованных вычислительных ресурсов. Отмечено, что применение бинарных спектрограмм как входного представления, устраняющего зависимость от абсолютного уровня мощности, в литературе не исследовалось.

В разделе 1.4 рассмотрены методы локализации источников радиоизлучения. Сопоставлены методы угла прихода (AOA), разности времен прихода (TDOA) и уровня принимаемого сигнала (RSS)². Показано, что AOA требует сложной антенной системы, несовместимой с SWaP, TDOA - точной временной синхронизации между разнесенными приемниками, а RSS пригоден для одноузловой бортовой реализации, но в чистом виде дает точность лишь 10-50 м. Обоснован выбор сочетания RSS с фильтром частиц как обеспечивающего наилучший баланс точности и вычислительной сложности при одноузловой бортовой реализации без синхронизации.

В разделе 1.5 рассмотрены методы подавления радиосигналов. Показано, что классические методы (заградительное, прицельное, сканирующее подавление) неэффективны³ против каналов управления с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) при периоде скачка ≤ 2 мс, а коммерческие системы реализуют фиксированные алгоритмы, не адаптируемые под идентифицированный протокол цели. Установлено, что в литературе отсутствует аналитическое обоснование условий эффективности протоколно-ориентированного подавления применительно к ППРЧ-сигналам и не исследовано сочетание одновременного излучения нескольких тональных компонент со сканированием по диапазону канала управления.

В разделе 1.6 проанализированы стандарты беспроводной связи для канала «борт-земля». Показано, что ни один стандарт по отдельности не удовлетворяет всему комплексу требований: Wi-Fi ограничен дальностью и помехоустойчивостью, решения на сотовой инфраструктуре (4G/5G, NB-IoT) зависят от внешнего оператора, а LoRa обеспечивает требуемую дальность и помехоустойчивость для телеметрии и команд, но недостаточен по пропускной способности для видеопотока. Обосновано раздельное построение канала: узкополосный помехоустойчивый канал на основе LoRa и широкополосный канал передачи видео, реализованные на единой ПОР-платформе.

¹ O'Shea T.J., Roy T., Clancy T.C. Over-the-Air Deep Learning Based Radio Signal Classification // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2018. Vol. 12, no. 1. P. 168-179.

² Exploring Radio Frequency-Based UAV Localization Techniques: A Comprehensive Review // IEEE Access. 2024. Vol. 12.

³ Poisel R. A. Modern Communications Jamming Principles and Techniques. 2nd ed. Artech House, 2011. 870 p.

В разделе 1.7 по результатам проведенного анализа выявлены следующие нерешенные научно-технические задачи: (№1) отсутствие методов обнаружения, устойчивых к нестационарному фоновому шуму при низком ОСШ в условиях ограниченных бортовых ресурсов; (№2) отсутствие архитектур нейронных сетей классификации, удовлетворяющих требованиям бортового исполнения; (№3) отсутствие экспериментально верифицированного метода протоколно-ориентированного подавления ППРЧ-сигналов; (№4) отсутствие интегрированных архитектур, объединяющих все пять функций на единой ПОР-платформе и верифицированных в летных условиях. Указанные пробелы определяют постановку задач последующих глав.

Во второй главе представлена двухкомпонентная архитектура системы мониторинга, классификации, локализации и подавления радиосигналов, включающей бортовой комплекс БПЛА и наземную станцию, а также обоснованы принципы ее построения.

В разделе 2.1 обоснован принцип функционального разделения системы на бортовой и наземный сегменты с учетом ограничений по массе, энергопотреблению и вычислительным ресурсам бортовой платформы. Показано, что унификация аппаратной части достигается использованием ПОР-платформы BladeRF 2.0 в обоих сегментах системы, а их взаимодействие обеспечивается беспроводным каналом связи на основе технологии LoRa. Структурная схема разработанной архитектуры представлена на рисунке 1.

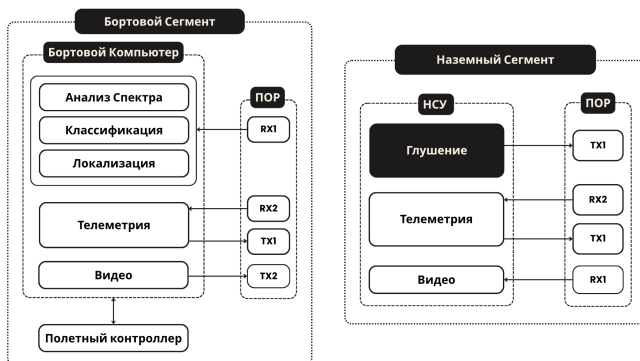


Рис. 1. Архитектура бортового и наземного сегментов системы

В разделе 2.2 на основе результатов анализа, выполненного в первой главе, сформированы функциональные возможности, необходимые для обеспечения полноценного функционирования разрабатываемой системы. Система должна обеспечивать:

- Ф1) непрерывный мониторинг радиочастотного спектра в диапазоне 400 МГц–6 ГГц;
- Ф2) автоматическую классификацию радиосигналов;
- Ф3) локализацию источников радиоизлучения с использованием одного приемника;
- Ф4) передачу результатов бортового анализа;

Ф5) реализацию протоколно-ориентированного подавления радиоканалов управления БПЛА на наземном сегменте по команде оператора;

Ф6) визуализацию радиочастотной обстановки, результатов классификации и локализации источников радиоизлучения в интерфейсе оператора.

В разделе 2.3 представлена архитектура бортового сегмента разработанной системы (рисунок 1). Бортовой сегмент включает вычислительный модуль, ПОР-платформу и полетный контроллер, взаимодействующие посредством стандартных интерфейсов обмена данными. Выбор такой структуры обусловлен необходимостью совместного выполнения задач радиомониторинга, классификации, локализации и передачи данных при соблюдении ограничений по массе, энергопотреблению и вычислительным ресурсам.

В разделе 2.4 описана архитектура наземного сегмента на базе портативного вычислителя, ПОР-модуля BladeRF 2.0 и программного обеспечения QGroundControl и GNU Radio, обеспечивающего прием и визуализацию результатов бортового анализа, двусторонний обмен командами, прием видеопотока и реализацию подавления; все функции выполняются параллельно за счет независимой работы каналов BladeRF 2.0.

В третьей главе излагаются разработанные алгоритмы бортовой обработки сигналов: энергетическое обнаружение с адаптивным порогом, классификация на основе модифицированной архитектуры ResNet-18 с формированием бинарных спектрограмм и аугментацией данных, локализация источников излучения методом RSS с фильтром частиц. Все алгоритмы реализованы как программные модули на базе GNU Radio и ROS 2 и исполняются на бортовом вычислителе Jetson Orin Nano.

В разделе 3.1 представлен алгоритм энергетического обнаружения с адаптивным порогом. Тестовая статистика вычисляется как средняя мощность спектральных составляющих кадра, полученного с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ), а порог обнаружения рассчитывается адаптивно по формуле:

$$T = \mu + Q^{-1}(P_{fa}) \cdot \sigma \quad (1)$$

где среднее μ и среднеквадратическое отклонение σ мощности шума оцениваются на скользящем окне из $L = 200$ спектральных кадров. Такая форма порога следует из критерия Неймана-Пирсона: при гауссовом шуме она гарантирует заданный уровень P_{fa} независимо от текущего уровня шума.

Экспериментальное сравнение с детектором с фиксированным порогом при одинаковой $P_{fa} = 10^{-3}$ показало, что адаптивный порог сохраняет работоспособность в существенно более широком диапазоне ОСШ: вероятность $P_d = 0,5$ достигается при ОСШ = -10,7 дБ против -7,1 дБ у фиксированного порога, что соответствует выигрышу по чувствительности около 3,6 дБ (рисунок 2). Среднее время обработки одного спектрального кадра на бортовом вычислителе составило 0,33 мс.

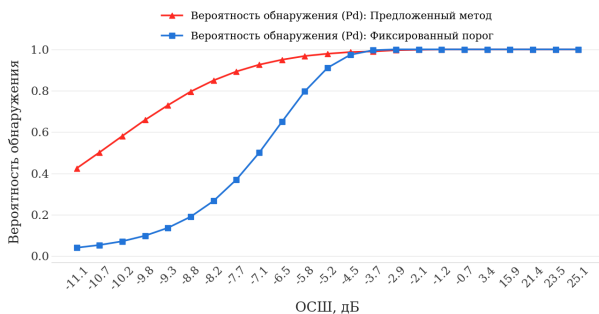


Рис. 2 Зависимость вероятности обнаружения P_d от ОСШ для адаптивного и фиксированного порогов при $P_{fa} = 10^{-3}$

Полученные результаты согласуются с известными теоретическими ограничениями⁴ энергетического обнаружения в области низких ОСШ и эффектом SNR-wall для классических детекторов. Это подтверждает повышение устойчивости предложенного подхода при ограниченной априорной информации о шумовой обстановке.

В разделе 3.2 описана методика классификации радиосигналов. В качестве входного представления используются бинарные спектрограммы, формируемые по принимаемому спектру в заданной полосе частот и временном интервале с применением адаптивной пороговой бинаризации. Сформирован специализированный датасет, содержащий 15,719 бинарную спектрограмму семи классов радиосигналов, включающий как одноклассовые, так и многоклассовые спектрограммы с одновременным присутствием нескольких радиосигналов (рисунок 3). Для повышения устойчивости классификации при низких ОСШ разработана двухэтапная процедура аугментации, включающая разреживание спектрограмм с последующим добавлением шумовых компонент, моделирующая увеличение затухания сигнала и снижение ОСШ.

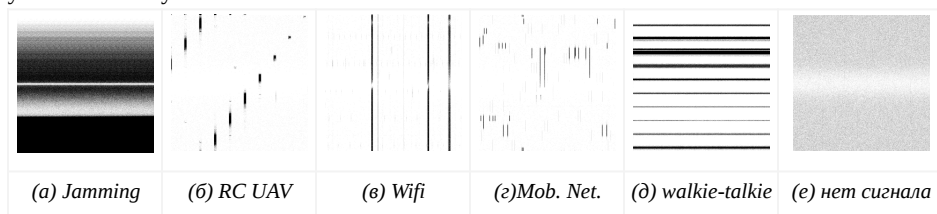


Рис. 3. Бинарные спектрограммы

Для сравнительных экспериментов были выбраны шесть архитектур сверточных нейронных сетей, охватывающих широкий спектр решений по критерию «точность-вычислительная сложность»: от легких мобильных моделей до глубоких остаточных сетей. В качестве базовой архитектуры классификатора предложена

⁴ R. Tandra и A. Sahai, «SNR Walls for Signal Detection,» IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, V. 2, № 1, pp. 4-17, 2008.

модификация ResNet-18, ориентированная на снижение вычислительной сложности при сохранении качества распознавания радиосигналов. В данной модификации из четырех групп остаточных блоков исходной сети (layer1-layer4) оставлена только первая (layer1), остальные исключены, что приводит к существенному упрощению структуры модели. За счет этого число обучаемых параметров сокращено до 157,959, что в 71 раз меньше по сравнению с оригинальной ResNet-18, а вычислительная сложность снижена до 1,534 GFLOPs.

Обучение всех моделей выполнялось на одинаковом наборе данных с фиксированным разбиением на обучающую, валидационную и тестовую выборки. Исходный датасет содержал 8,635 одноклассовых бинарных спектрограмм; после двухэтапной аугментации дополнительно сформировано 3,918 одноклассовых образцов, что довело объем одноклассовой части до 12,553 спектрограмм. Дополнительно синтезировано 3166 многометочных образцов, включающих комбинации Bluetooth + Wi-Fi, Bluetooth + UAV RC и Wi-Fi + UAV RC. Итоговый объем датасета составил 15,719 спектрограмм, разделенных в соотношении 70 % : 15 % : 15 %. Идентичные условия обучения (функция потерь, оптимизатор, гиперпараметры и число эпох) применялись ко всем сравниваемым архитектурам, что обеспечивает корректность сопоставления результатов. Сравнительный анализ, представленный в таблице 1, показал, что предложенная архитектура достигает значения F1-score = 0,92 при числе обучаемых параметров 0,158 млн и времени инференса 0,54 мс.

Таблица 1 - Сравнительный анализ архитектур классификаторов

Модель	F1-score	Precision	Recall	Параметры	FLOPs	Время (мс)
LightweightCNN	0,91	0,94	0,89	~0.43M	0.672 Г	~0.658
MobileNetV3-Small	0,89	0,89	0,89	~1.525M	0.159 Г	~2.649
EfficientNet-B0	0,94	0,94	0,95	~4.017M	1.081 Г	~4.065
ResNet-18	0,95	0,95	0,95	~11.180M	4.763 Г	~2.446
ResNet-50	0,96	0,95	0,96	~25.6M	10.793 Г	~6.463
Предложенная	0,92	0,94	0,91	~0.158M	1.534 Г	~0.540

Для оценки практической применимости предложенной архитектуры был проведен эксперимент по исследованию устойчивости моделей к ухудшению качества принимаемого сигнала, выраженного через снижение ОСИШ. В качестве исходных данных использовались зарегистрированные I/Q-реализации радиосигналов классов RC и Wi-Fi, полученные при максимальной чувствительности приемного тракта. Для моделирования различных условий приема к исходным реализациям последовательно добавлялся аддитивный белый гауссовский шум, что позволило сформировать контролируемый тестовый набор в диапазоне ОСИШ от +20 до –15 дБ с шагом дискретизации 5 дБ.

В рамках данного эксперимента сравнивалось качество классификации моделей при

разных уровнях ОСШ. Для анализа были выбраны три модели: предложенная архитектура, LightweightCNN как легковесные модели и ResNet-50 как наиболее точная.

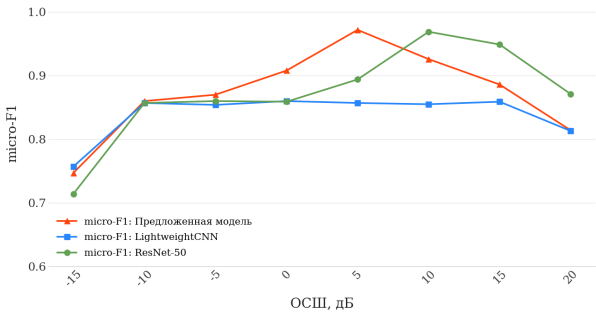


Рис. 4. Зависимость micro-F1 от ОСШ для исследуемых архитектур классификаторов

Результаты эксперимента показали, что во всем исследуемом диапазоне ОСШ (от +20 до -15 дБ) предложенная модель демонстрирует устойчивое качество классификации с micro-F1 в диапазоне 0,75-0,97 и сохраняет значение не ниже 0,75 . При этом ее поведение в области низких ОСШ сопоставимо с ResNet-50, однако достигается при существенно меньших вычислительных затратах и времени инференса, что подтверждает эффективность предложенной архитектуры для применения в условиях ограниченных ресурсов бортовой вычислительной платформы (рисунк 4).

Для подтверждения результатов моделирования снижения ОСШ проведен полевой эксперимент с естественным уменьшением уровня сигнала за счет увеличения расстояния между источником и приемником. В качестве источника использовался пульт управления БПЛА (UAV RC). Регистрация выполнялась в городской среде на расстояниях 50, 100 и 200 м; для каждого расстояния записывалось около 100 реализаций. Классификация проводилась для LightweightCNN, ResNet-50 и предложенной архитектуры.

Таблица 2 - Влияние дальности и уровня ОСШ на качество классификации

Расстояние	ОСШ (внутр.)	ОСШ (полоса)	LightweightCNN	ResNet-50	Предложенная
50 м	13,7 дБ	6,7 дБ	0,986	0,988	0,995
100 м	3,7 дБ	-10,4 дБ	0,853	0,938	0,884
200 м	0,5 дБ	-13,1 дБ	0,724	0,897	0,744

Оценка ОСШ выполнялась внутриполостным методом в полосе 500 кГц вокруг спектрального пика. Дополнительно рассчитывалось ОСШ по полной полосе захвата. Результаты эксперимента представлены в таблице 2. Результаты эксперимента показывают устойчивость предложенной архитектуры к изменению дальности приема и уровня ОСШ. Для сигнала UAV RC значение micro-F1

составляет 0,995 при расстоянии 50 м (ОСШ 13,7 дБ), 0,884 при 100 м (ОСШ 3,7 дБ) и сохраняется на уровне 0,744 при 200 м (ОСШ 0,5 дБ), что подтверждает работоспособность модели в условиях низкого ОСШ. Следует отметить, что сохранение качества классификации при отрицательных значениях ОСШ соответствует современным направлениям развития методов автоматической классификации⁵ радиосигналов на основе глубокого обучения.

Отдельно проверялась обобщающая способность модели к распознаванию сочетаний сигналов, которых она не видела при обучении. Класс Mobile Network обучался только в одиночном виде; на тестировании его искусственно совмещали (сложением сигналов) с UAV RC, Bluetooth и Wi-Fi по 50 образцов, всего 150. Выбор рассматриваемых классов обусловлен их перекрытием по частотному диапазону в условиях регистрации сигналов в общей полосе наблюдения. Общая точность составила 72,0 %: оба сигнала распознаны верно в 18 % случаев, один из двух в 54 %, ошибка в 28 %. Снижение качества классификации обусловлено отсутствием в обучающей выборке примеров комбинированных сигналов с участием класса Mobile Network.

В разделе 3.3 рассматривается метод локализации источников радиоизлучения на основе уровня принимаемого сигнала (RSS) и фильтра частиц. Каждая частица интерпретируется как гипотеза о положении источника в локальной системе координат; на каждом шаге выполняются предсказание состояния, взвешивание по гауссовой функции правдоподобия и систематический ресемплинг. Опорный уровень мощности P_0 логарифмической модели распространения обновляется рекуррентно. Число частиц $N = 2500$ выбрано по результатам анализа зависимости RMSE и времени одной итерации на платформе Jetson Orin Nano (раздел 3.3 диссертации); при данном значении время одной итерации составляет 0,32 мс.

Экспериментальная верификация проведена в полевых условиях при движении по маршруту, состоящему из двух взаимно перпендикулярных прямолинейных участков, обеспечивающих измерения RSS с различных направлений и повышение устойчивости оценки положения источника в одноприемной системе. По результатам 10 измерений на каждой дистанции RMSE составила 5,3 м на 30 м и не превышала 13,5 м в диапазоне до 50 м. При увеличении расстояния до 100 м значение RMSE возросло до 20,0 м. Результаты подтверждают характерную для RSS-методов локализации зависимость точности от расстояния, обусловленную логарифмическим ослаблением сигнала и ухудшением устойчивости оценивания при снижении мощности принимаемого излучения. Наблюдаемая зависимость точности от расстояния согласуется с результатами исследований⁶ RSS-основанных методов локализации, где отмечается рост погрешности оценки координат при увеличении дистанции и снижении информативности измерений.

В четвертой главе излагаются алгоритмы наземного сегмента: реализация двунаправленного канала связи с бортовым сегментом, протоколно-ориентированное

⁵ Zhang F., Luo C., Xu J., Luo Y., Zheng F. C. Deep Learning Based Automatic Modulation Recognition: Models, Datasets, and Challenges, 2022.

⁶ A. S. Abdalla и V. Marojevic, «Communications Standards for Unmanned Aircraft Systems: The 3GPP Perspective and Research Drivers,» IEEE Communications Standards Magazine, V. 5, № 2, pp. 20-26, 2021.

подавление радиосигналов по результатам бортовой классификации и визуализация радиочастотной обстановки в интерфейсе оператора.

В разделе 4.1 описана подсистема связи, реализующая два независимых канала в режиме частотного дуплексирования (FDD): канал телеметрии и передачи команд управления на основе протокола LoRa (модуляция CSS) и канал передачи видеопотока на основе стандарта DVB-T (модуляция OFDM). Представлены алгоритмы программной реализации обоих каналов в среде GNU Radio, включая формирование и обработку сигналов, организацию обмена данными с использованием ROS 2, а также выбор параметров модуляции и кодирования, обеспечивающих требуемый компромисс между дальностью связи, пропускной способностью, задержкой и энергопотреблением.

Работоспособность предложенной подсистемы подтверждена экспериментальными исследованиями. Канал LoRa (SF = 7, BW = 3 МГц, CR = 4/5) при выходной мощности 8 дБм обеспечил дальность 400 м с нулевыми потерями пакетов и энергетический запас 47 дБ, а канал DVB-T (16-QAM, CR = 1/2, режим 2K) - передачу видеопотока со скоростью 6,64 Мбит/с в полосе 7 МГц на дальности 200 м при задержке 1,2 с. Выбранная архитектура канала LoRa соответствует современным подходам⁷ к реализации физического уровня LoRa на ПОР-платформах. Общее энергопотребление ПОР-модуля в режиме полного дуплекса не превысило 3 Вт.

В отличие от типовых систем телеметрии БПЛА (SiK, RFD900, SX127x), требующих отдельного радиомодуля с фиксированными параметрами, предложенное решение полностью реализовано программно на едином ПОР-модуле, который одновременно обеспечивает прием, классификацию радиосигналов и передачу видеопотока.

В разделе 4.2 представлен метод протольно-ориентированного многотонального сканирующего подавления. Он объединяет формирование помехового сигнала в соответствии с идентифицированным классом цели, одновременное излучение нескольких тональных компонент и сканирование частотного диапазона. Разработана математическая модель помехового сигнала, описывающая его как суперпозицию M частотно-разнесенных компонент, параметры которых автоматически формируются по результатам бортовой классификации цели.

Таблица 3 - Сравнение методов подавления по энергопотреблению, RSSI и ОСШ

Метод подавления	Р	RSSI лаб.	RSSI поле	ОСШ лаб.	ОСШ поле
Заградительный	600 мВт	25 %	70 %	-6 дБ	10 дБ
Тональный	30 мВт	75 %	97 %	11 дБ	16 дБ
Многотональный	360 мВт	14 %	73 %	-7 дБ	9 дБ
Сканирующий	280 мВт	20 %	75 %	-2 дБ	7 дБ
Предложенный	280 мВт	3 %	50 %	-8 дБ	5 дБ

⁷ J. Tapparel, O. Afisiadis, P. Mayoraz, A. Balatsoukas-Stimming и A. Burg, «An Open-Source LoRa Physical Layer Prototype on GNU Radio,» 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), pp. 1–5, 2020.

Эффективность предложенного метода подтверждена экспериментами исследованиями в лабораторных и полевых условиях на FPV-БПЛА с аппаратурой управления SIYI FT24 и FrSky Taranis X9D (2,4 ГГц, ППРЧ). В сравнении с заградительным, тональным, многотональным и сканирующим методами предложенный метод продемонстрировал наибольшее ослабление канала управления среди рассмотренных методов. Критериями оценки являлись уровень принимаемого сигнала (RSSI), отношение ОСШ и энергопотребление. В лабораторных условиях RSSI составил 3 %, а ОСШ -8 дБ; в полевых условиях (дальность 20-30 м) достигнуты значения RSSI 50 % и ОСШ 5 дБ. При энергопотреблении 280 мВт предложенный метод потребляет в 2,1 раза меньше энергии по сравнению с заградительным методом.

В разделе 4.3 представлена модификация программного обеспечения наземной станции QGroundControl, направленная на расширение функциональности интерфейса оператора для задач спектрального анализа и управления режимами сканирования. Реализованы четыре режима задания диапазона сканирования: по предустановленному классу сигнала, полное сканирование в диапазоне 100-6000 МГц, произвольный диапазон и фиксированная частота, что обеспечивает гибкую настройку процесса радиомониторинга. Кроме того, реализована визуализация пространственно локализованных источников радиосигналов на карте местности, полученных по результатам обработки и классификации сигналов бортовой системой, с отображением класса сигнала, координат и оцененной мощности.

В пятой главе представлена комплексная экспериментальная оценка системы. Целью экспериментов являлась верификация корректного совместного функционирования всех разработанных подсистем: обнаружения, классификации, локализации, подавления и каналов связи, интегрированных в единую систему обработки и управления радиосигналами.

В разделе 5.1 описан экспериментальный стенд, предназначенный для комплексной верификации разработанной системы в ходе реальных экспериментов.

Бортовой сегмент экспериментального стенда был построен на базе БПЛА квадрокоптерного типа и включал ПОР BladeRF 2.0 micro xA4 с четырьмя независимыми радиоканалами, вычислитель NVIDIA Jetson Orin Nano 8GB и полетный контроллер Pixhawk 6C. Данная конфигурация обеспечивала реализацию алгоритмов радиомониторинга, обработки сигналов и управления в составе единой бортовой платформы.

Наземный сегмент был реализован на базе портативного вычислителя, BladeRF 2.0, усилителя мощности и направленной антенны Yagi-Uda с коэффициентом усиления 7 дБи. Указанная конфигурация обеспечивала выполнение задач приема и передачи радиосигналов, а также формирования активных радиотехнических воздействий в рамках единой экспериментальной платформы.

В качестве целевых объектов использовались FPV-БПЛА с пультами управления SIYI FT24 и FrSky Taranis X9D, работающими в диапазоне 2,4 ГГц с применением ППРЧ, а также типовые источники радиосигналов, включающие портативную радиостанцию Baofeng, Bluetooth-устройство и точку доступа Wi-Fi стандарта IEEE 802.11n. Такой набор

целей позволял оценить работоспособность разработанных решений в отношении различных типов радиоканалов и протоколов связи.

В разделе 5.2 изложена методология испытаний, включавшая три серии экспериментов: оценку сквозной задержки от обнаружения сигнала до отображения результата на наземной станции, комплексную оценку бортового сегмента в полете, а также оценку подсистемы связи при одновременной работе всех бортовых модулей. В рамках испытаний были проведены три серии экспериментов, охватывающие оценку временных характеристик, верификацию алгоритмов обнаружения, классификации и локализации, а также проверку устойчивости каналов связи.

В разделе 5.3 приведены результаты полевых испытаний. Сквозная задержка измерялась поэтапной фиксацией временных меток (100 реализаций на каждый этап); результаты приведены в таблице 4. Суммарная средняя задержка бортовых этапов составила 35,6 мс.

Основной вклад в общую задержку вносит этап классификации (33,3 мс в среднем), включающий формирование бинарной спектрограммы и выполнение нейросетевого инференса; время выполнения инференса модели составляет 0,54 мс.

Таблица 4 - Измеренные задержки этапов информационного конвейера

Этап обработки	Среднее, мс	Макс., мс
Вычисление БПФ (N = 1024)	0,33	0,55
Работа детектора	0,001	0,001
Классификация (спектрограмма + инференс)	33,3	45,6
Итерация фильтра частиц	10,06	14,2
Передача через ROS 2	1,94	2,5
Суммарная задержка	35,6	62,85

Комплексная проверка бортового сегмента подтвердила одновременное функционирование подсистем обнаружения, классификации и локализации. Вероятность правильного обнаружения составила $P_d = 1,0$ при вероятности ложной тревоги $P_{fa} = 10^{-3}$ на дальности до 140 м. Общая точность классификации составила 92,13 %. Среднеквадратическая ошибка локализации RMSE не превышала 13,5 м в рабочей зоне до 50 м.

В разделе 5.4 проведено сравнительное исследование разработанной системы с существующими ПОР-системами (USRP+FPGA, USRP B210, USRP B200-mini) и коммерческими решениями в области радиомониторинга и противодействия БПЛА. Оценка проводилась по функциональным возможностям, степени интеграции, массогабаритным характеристикам и наличию летной верификации.

Результаты сравнения с исследовательскими ПОР-системами приведены в таблице 5. Рассмотренные системы, как правило, реализуют не более двух функциональных модулей, не поддерживают бортовое размещение и не интегрируют подсистемы связи, классификации и подавления в единую архитектуру. В отличие от них, разработанная

система объединяет пять функциональных подсистем и обеспечивает их совместную работу на единой бортовой ПОР-платформе массой 39 г с подтвержденной летной верификацией.

Таблица 5 - Сравнение с исследовательскими ПОР-системами

Характеристика	USRP+FPGA ⁸	USRP B210 ⁹	USRP B200-mini ¹⁰	Предлаг.
Число функций	1	2	1	5
Бортовое размещение	Нет	Нет	Нет	Да
Летная верификация	Нет	Нет	Нет	Да
Масса модуля, г	>500	>500	>200	39
Параметры классиф.	-	-	>1 млн	157,959

Коммерческие системы (Chuuya 3.0, AARTOS, Dedrone, DroneGun Mk4) обеспечивают не более трех функций, ориентированы на стационарное или носимое применение и не реализуют протоколно-ориентированное подавление. Кроме того, стоимость многофункциональных комплексов превышает стоимость предложенного решения в 5-37 раз.

В заключении содержатся выводы разработанных методов.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан и реализован метод адаптивного энергетического обнаружения радиосигналов с динамическим порогом, обеспечивающий устойчивое обнаружение сигналов в условиях нестационарной шумовой обстановки при ограниченных вычислительных ресурсах.
2. Разработан и реализован модуль классификации радиосигналов для работы в режиме реального времени на основе бинарных спектрограмм и усеченной архитектуры ResNet-18, обеспечивающий работу на бортовой вычислительной платформе.
3. Разработан и реализован метод локализации источников радиоизлучения с использованием одного ПОР приемника на движущейся бортовой платформе.
4. Разработана и реализована интегрированная подсистема помехоустойчивой связи на основе ПОР, обеспечивающая передачу телеметрических данных и видеопотока между бортовым и наземным сегментами системы.
5. Разработан и реализован метод протоколно-ориентированного многотонального сканирующего подавления радиоканалов управления БПЛА, обеспечивающий

⁸ Pinto da Costa S., et al. Wideband Monitoring System of Drone Emissions Based on SDR Technology with RFNoC Architecture // Drones. - 2026. - Vol. 10, No. 2. - Art. 117

⁹ Design and Development of an SDR-Based System for Real-Time Detection and Characterization of Drone RF Signatures // Scientific Reports. - 2026

¹⁰ Mohanti S., Soltani N., Sankhe K., Jaisinghani D., Di Felice M., Chowdhury K.R. AirID: Injecting a Custom RF Fingerprint for Enhanced UAV Identification Using Deep Learning // Proc. IEEE GLOBECOM. - Taipei, Taiwan, 2020.

повышение эффективности радиопротиводействия при снижении энергопотребления.

6. Выполнена интеграция разработанных методов и программных модулей в единую систему радиомониторинга и радиопротиводействия на основе единой ПОР-платформы и проведена ее экспериментальная верификация в лабораторных и полевых условиях, подтвердившая работоспособность предложенных решений.

Публикации по теме научного доклада:

1. H. Grigoryan, L. Kirakosyan и S. Sargsyan, «A Method of Protocol-Aware Multi-tone Sweep Jamming,» Труды Института системного программирования РАН (Труды ИСП РАН), V. 36, № 3, pp. 273-282, 2024.
2. Л. Киракосян, «Система обнаружения и интеллектуального подавления каналов связи БПЛА,» Вестник Российско-Армянского университета, № 2, стр. 26-35, 2025.
3. L. Kirakosyan, M. Navoyan, A. Sardaryan, V. Melkonyan и S. Sargsyan, «Real-Time Radio Signal Classification Based on Spectrograms,» Programming and Computer Software, V. 51, № 7, pp. 463-471, 2025.
4. H. Tumanyan, L. Kirakosyan, «A Software-Defined Radio Approach to LoRa-Based Communication for Unmanned Aerial Vehicles,» Vestnik Russian-Armenian University, № 1, pp. 51-59, 2026.

Ամփոփում

Լիլիա Հայկի Կիրակոսյան

Ռադիոազդանշանների հայտնաբերման, դասակարգման և իլյաժման համակարգի մշակում

Ատենախոսական աշխատանքի նպատակն է մշակել ծրագրով սահմանվող ռադիոյի (ԾՍՌ) միասնական հարթակի վրա հիմնված համալիր շարժական ռադիոմոնիթորինգի և ռադիոէլեկտրոնային հակազդեցության համակարգ, որտեղ բորտային համակարգը ապահովում է ռադիոազդանշանների հայտնաբերումը, դասակարգումը, տեղորոշումը և տվյալների փոխանցումը վերգետնյա կայան, իսկ վերգետնյա կայանը իրականացնում է ստացված տեղեկատվության վերլուծությունն ու չթուլյատրված ռադիոճառագայթումների հետագա իլյաժումը:

Աշխատանքի հիմնական արդյունքներն են.

1. Մշակվել և իրականացվել է ռադիոազդանշանների ադապտիվ էներգետիկ հայտնաբերման մեթոդ՝ դինամիկ շեմի կիրառմամբ, որն ապահովում է ազդանշանների կայուն հայտնաբերում ոչ ստացիոնար աղբյուրի միջավայրում՝ սահմանափակ հաշվարկային ռեսուրսների պայմաններում:
2. Մշակվել և իրականացվել է ռադիոազդանշանների իրական ժամանակում աշխատող դասակարգման մոդուլ՝ հիմնված երկուական սպեկտրոգրամների և ResNet-18-ի կրճատված ճարտարապետության վրա, որն աշխատում է բորտային հաշվարկային հարթակում:
3. Մշակվել և իրականացվել է ռադիոճառագայթման աղբյուրների տեղորոշման մեթոդ՝ շարժվող բորտային հարթակի վրա տեղադրված մեկ ԾՍՌ ընդունիչի կիրառմամբ:
4. Մշակվել և իրականացվել է ԾՍՌ-ի հիման վրա, ինտեգրված աղմկակայուն կապի ենթահամակարգ, որն ապահովում է հեռաչափական տվյալների և տեսահոսքի փոխանցումը համակարգի բորտային և վերգետնյա սեգմենտների միջև:
5. Մշակվել և իրականացվել է ԱԹՍ-ների կառավարման ռադիոալիքների պրոտոկոլ-ուղղորդված բազմատոնային սկանավորող իլյաժման մեթոդ, որն ապահովում է ռադիոէլեկտրոնային հակազդեցության արդյունավետության բարձրացում՝ էներգասպառման նվազեցման պայմաններում:
6. Իրականացվել է մշակված մեթոդների և ծրագրային մոդուլների համակարգային ինտեգրումը ԾՍՌ-ի միասնական հարթակի վրա, ինչպես նաև կատարվել է մշակված համակարգի համալիր փորձարարական վավերացումը լաբորատոր և դաշտային պայմաններում, որը հաստատել է առաջարկված լուծումների աշխատունակությունը:

Գիտական նորությունը. Պաշտպանության են ներկայացվում հետևյալ նոր արդյունքները.

1. Առաջարկվել է ռադիոազդանշանների էներգետիկ հայտնաբերման ադապտիվ մեթոդ՝ դինամիկ շեմի կիրառմամբ, որը հիմնված է աղմուկի մակարդակի սահող վիճակագրական գնահատման վրա և ապահովում է հայտնաբերման կայունություն ցածր ազդանշան/աղմուկ հարաբերակցությունների դեպքում:
2. Մշակվել է ռադիոազդանշանների իրական ժամանակում աշխատող դասակարգման մեթոդ՝ կրճատված նեյրոնային ցանցի մոդելի և սպեկտրոգրամների երկուսական ներկայացման կիրառմամբ, որն ապահովում է աշխատունակություն բորտային հարթակների սահմանափակ հաշվարկային ռեսուրսների պայմաններում:
3. Առաջարկվել է ռադիոճառագայթման աղբյուրների տեղորոշման մեթոդ՝ մեկ ԾՍՌ ընդունիչի կիրառմամբ, որը հիմնված է շարժվող հարթակի տեղաշարժի և ազդանշանի մակարդակի հաջորդական չափումների համատեղ վերլուծության վրա:
4. Մշակվել է պրոտոկոլ-ուղղորդված բազմատոնային սկանավորող խլացման մոտեցում՝ որն ապահովում է կապի ընտրողական խաթարում՝ էներգետիկ արդյունավետության բարձրացման պայմաններում:
5. Մշակվել է ԾՍՌ-ի վրա հիմնված շարժական ռադիոմոնիթորինգի և հակազդեցության երկբաղադրիչ ճարտարապետություն՝ օդային և վերգետնյա հատվածների գործառույթային բաշխմամբ:

Conclusion

Lilia Kirakosyan

Development of a system for detection, classification, and suppression of radio signals

The objective of this dissertation is to develop a comprehensive mobile radio monitoring and electronic countermeasure system based on a unified Software-Defined Radio (SDR) platform, in which the airborne segment performs the detection, classification, and localization of radio signals, as well as the transmission of collected data to a ground station. The ground segment is responsible for processing the received information and subsequently suppressing unauthorized radio emissions.

The main results of the dissertation research are as follows:

1. Developed and implemented an adaptive energy-based radio signal detection method with a dynamic threshold, providing robust signal detection under non-stationary noise conditions with limited computational resources.
2. Developed and implemented a real-time radio signal classification module based on binary spectrograms and a truncated ResNet-18 architecture, enabling operation on an onboard computing platform.

3. Developed and implemented a method for radio emission source localization based on a single SDR receiver operating on a moving airborne platform.
4. Developed and implemented an integrated noise-robust communication subsystem based on SDR, enabling the transmission of telemetry data and video streams between the airborne and ground segments of the system.
5. Developed and implemented a protocol-oriented multitone scanning jamming method targeting UAV control radio channels, improving the efficiency of electronic countermeasures and reducing energy consumption.
6. Developed and implemented the integration of the proposed methods and software modules into a unified SDR-based radio monitoring and electronic countermeasure system. Experimental evaluation in laboratory and field environments confirmed the effectiveness and operability of the proposed solutions.

Scientific novelty. The following new results are presented for defense:

1. An adaptive energy-based radio signal detection method with a dynamic threshold has been proposed, in which the threshold is determined by a sliding estimate of the noise level. The method improves detection robustness under low signal-to-noise ratio conditions and operates under the limited computational resources of onboard platforms.
2. A real-time radio signal classification method has been developed based on a truncated neural network architecture and a binary spectrogram representation, ensuring operability under the constrained computational resources of onboard platforms.
3. A method for localizing radio emission sources using a single SDR-based receiver on a moving airborne platform has been proposed. The method is based on joint processing of sequential received signal strength measurements and platform motion data.
4. A protocol-oriented multitone scanning jamming method for radio signals has been developed, utilizing detection and classification results obtained from the UAV onboard system.
5. A two-component architecture of a mobile radio monitoring and electronic countermeasure system based on a unified SDR platform has been developed. In this architecture, the airborne platform performs signal detection, classification, localization, and data transmission, whereas the ground station is responsible for processing the received information and subsequent signal suppression.