Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.42

Стецко
Вадим Юрьевич

Приложение для распознавания беспилотных летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра
по специальности 7-06-0612-02 – Информатика и технологии программирования

Научный руководитель
Боброва Н.Л.
к.т.н., доцент

Минск 2026

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается активное распространение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных областях деятельности, включая мониторинг территорий, промышленный контроль, сельское хозяйство и обеспечение безопасности. Одновременно с расширением сфер применения возрастает и количество случаев несанкционированного использования БПЛА, что создает потенциальные угрозы безопасности объектов инфраструктуры и воздушного пространства.

Одним из наиболее перспективных способов обнаружения БПЛА является радиотехнический метод, основанный на анализе радиосигналов, излучаемых бортовыми системами управления, телеметрии и передачи данных. Современные БПЛА используют цифровые каналы связи, формирующие сложные и нестационарные радиосигналы, анализ которых традиционными методами затруднен в условиях насыщенной радиообстановки.

В связи с этим актуальной является задача применения методов глубокого обучения для автоматического анализа радиосигналов БПЛА. Представление радиосигналов в виде спектрограмм позволяет использовать алгоритмы компьютерного зрения и нейронные сети для детектирования и распознавания сигналов БПЛА в режиме реального времени.

Данная магистерская диссертация посвящена разработке аппаратно-программной системы распознавания беспилотных летательных аппаратов по их радиосигналам с использованием нейронных сетей глубокого обучения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель и задачи исследования

Целью магистерской диссертации является разработка аппаратно-программной системы, предназначенной для автоматического распознавания беспилотных летательных аппаратов по их радиосигналам в режиме реального времени с использованием методов глубокого обучения.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

– провести анализ существующих методов обнаружения и распознавания беспилотных летательных аппаратов;

– исследовать особенности радиосигналов БПЛА;

– обосновать использование спектрограмм в качестве формы представления радиосигналов;

– исследовать возможность применения методов глубокого обучения и нейронных сетей для анализа спектрограмм радиосигналов;

– разработать архитектуру аппаратно-программного комплекса распознавания БПЛА;

– сформировать и разметить датасет спектрограмм радиосигналов БПЛА, полученных в различных условиях радиообстановки;

– обучить нейронные сети для детектирования сигналов БПЛА и провести сравнительный анализ архитектур;

– разработать клиентское приложение оператора для визуализации результатов и управления системой;

– провести экспериментальную оценку эффективности разработанной системы.

Объектом исследования являются радиосигналы, излучаемые беспилотными летательными аппаратами в процессе их управления, передачи телеметрии и данных полезной нагрузки.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы обработки и анализа радиосигналов БПЛА, основанные на временно-частотном представлении сигналов в виде спектрограмм и применении нейронных сетей глубокого обучения для их автоматического распознавания.

Основная *гипотеза* исследования заключается в том, что применение методов глубокого обучения, в частности нейронных сетей детекции объектов, к спектрограммам радиосигналов позволяет обеспечить эффективное, устойчивое и автоматическое распознавание БПЛА в условиях сложной и изменяющейся радиообстановки при сохранении возможности работы системы в режиме реального времени.

Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики

Работа выполнялась в соответствии с научно-техническими заданиями и планами работ кафедры информатики.

Использование методов глубокого обучения и современных встраиваемых вычислительных платформ соответствует актуальным тенденциям цифровизации и внедрения интеллектуальных систем анализа данных в промышленности и сфере безопасности.

Личный вклад соискателя

Результаты, приведённые в диссертации, получены соискателем лично. Вклад научного руководителя Н. Л. Бобровой заключается в формулировке целей и задач исследования.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

– научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки и образования» (Пенза, Россия, 2023);

– XVIII Международной научно-практической конференции «Развитие науки, общества и образования: актуальные вопросы теории и практики» (Пенза, Россия, 2024);

– XI Международной научно-практической конференции «Молодой ученый» (Пенза, Россия, 2025);

– XIII Международной научно-практической конференции «Большая студенческая конференция» (Пенза, Россия, 2025);

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 4 работы в сборниках трудов и материалов международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, двух глав, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора и приложений. В первой главе проведён анализ методов обнаружения и

распознавания БПЛА, рассмотрены особенности радиосигналов и теоретические основы применения спектрограмм и нейронных сетей. Во второй главе описана разработка аппаратно-программной системы, формирование датасета, обучение нейронных сетей и анализ полученных результатов.

Общий объем работы составляет 66 страниц, из которых основного текста – 45 страниц, 33 рисунка на 16 страницах, 4 таблицы на 5 страницах, список использованных источников из 19 наименований на 2 страницах и приложения на 11 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой главе проведён анализ современного состояния проблемы обнаружения и распознавания беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены основные методы обнаружения БПЛА, включая радиолокационные, оптико-электронные, акустические и радиотехнические подходы, а также проанализированы их преимущества и ограничения. Показано, что радиотехнический метод, основанный на анализе радиосигналов, является одним из наиболее универсальных и перспективных, особенно в условиях ограниченной видимости и сложных метеорологических условий.

В первой главе исследованы особенности радиосигналов, используемых беспилотными летательными аппаратами для управления, передачи телеметрии и видеоданных. Отмечено, что данные сигналы являются нестационарными и обладают сложной временно-частотной структурой, что затрудняет их анализ традиционными методами. Рассмотрены методы временно-частотного анализа радиосигналов, в частности кратковременное преобразование Фурье и представление сигналов в виде спектрограмм.

Обосновано использование спектрограмм в качестве формы представления радиосигналов БПЛА, позволяющей свести задачу распознавания радиосигналов к задаче анализа изображений. Проведён обзор методов машинного обучения и глубокого обучения, применяемых для анализа изображений, с акцентом на сверточные нейронные сети и алгоритмы детектирования объектов. Рассмотрены архитектуры нейронных сетей семейства YOLO и показана их целесообразность для решения задач распознавания радиосигналов БПЛА в режиме реального времени.

Во второй главе описана разработка аппаратно-программной системы распознавания беспилотных летательных аппаратов по их радиосигналам. Представлена архитектура комплекса, включающая блок цифровой обработки сигналов, сервер обработки и распознавания данных на встраиваемой вычислительной платформе, а также клиентское приложение оператора.

Описаны принципы взаимодействия компонентов системы и используемые сетевые протоколы передачи данных.

Во второй главе подробно рассмотрен процесс формирования датасета спектрограмм радиосигналов БПЛА. Описаны типы беспилотных летательных аппаратов, сигналы которых использовались при сборе данных, а также условия сбора данных, включающие офисные, полевые и зарубежные сценарии эксплуатации. Приведён процесс разметки спектрограмм с использованием ограничивающих рамок и итеративный подход к уточнению аннотаций с применением промежуточных версий нейронной сети.

Далее описан процесс обучения нейронных сетей для детектирования сигналов БПЛА на спектрограммах. Рассмотрены используемые архитектуры нейронных сетей семейства YOLO, приведены параметры обучения и выполнен анализ динамики процесса обучения. Проведён сравнительный анализ архитектур YOLOv5 и YOLOv10, по результатам которого обоснован выбор конфигурации YOLOv10-M в качестве основной модели.

Во второй главе также описано клиентское приложение оператора, реализованное для визуализации спектрограмм радиосигналов, отображения результатов детектирования и управления серверной частью системы. Рассмотрены основные функциональные возможности приложения и его взаимодействие с сервером посредством протокола gRPC.

Заключительным этапом второй главы является описание тестирования нейронной сети и всей системы в полевых условиях. Представлены результаты испытаний, проведённых в различных регионах Республики Беларусь, а также в странах Африки и Азии. Описан итеративный процесс дообучения нейронной сети на основе выявленных ложных срабатываний и введение механизма запретных зон для учёта сигналов сотовой связи стандартов 4G и 5G. Показано, что проведённые мероприятия позволили повысить устойчивость системы к помехам и расширить область её практического применения.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам выполненной работы и определены направления дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1 Проведён комплексный анализ методов обнаружения и распознавания беспилотных летательных аппаратов и обоснована целесообразность использования радиотехнического метода, основанного на анализе радиосигналов, как одного из наиболее универсальных и устойчивых к внешним условиям.

2 Разработана архитектура аппаратно-программного комплекса распознавания беспилотных летательных аппаратов, обеспечивающая обработку радиосигналов в режиме реального времени и включающая блок цифровой обработки сигналов, сервер распознавания на встраиваемой вычислительной платформе и клиентское приложение оператора.

3 Сформирован и размечен оригинальный датасет спектрограмм радиосигналов БПЛА, полученных в различных условиях радиообстановки, включая офисные, полевые и зарубежные сценарии эксплуатации. Реализован итеративный подход к уточнению разметки данных с использованием промежуточных версий обучаемой нейронной сети.

4 Исследована возможность применения нейронных сетей семейства YOLO для детектирования радиосигналов БПЛА на спектрограммах. Выполнено обучение и сравнительный анализ архитектур YOLOv5 и YOLOv10, по результатам которого обоснован выбор конфигурации YOLOv10-M как обеспечивающей оптимальное соотношение точности и быстродействия.

5 Разработано клиентское приложение оператора, обеспечивающее визуализацию спектрограмм радиосигналов, отображение результатов детекции и управление параметрами обработки и аппаратными средствами системы посредством протокола gRPC.

6 Проведено тестирование нейронной сети и всей системы в полевых условиях на территории Республики Беларусь, а также в странах Африки и Азии. Выявлены особенности радиообстановки, связанные с присутствием сигналов сотовой связи стандартов 4G и 5G, и предложен механизм введения запретных зон во временно-частотной области, позволяющий снизить количество ложных срабатываний.

7 Экспериментально подтверждена эффективность предложенного подхода и устойчивость разработанной системы к изменениям условий радиоэфира, что подтверждает справедливость выдвинутой в работе гипотезы.

Рекомендации по практическому использованию результатов

1 При разработке и внедрении систем мониторинга радиочастотного спектра и обнаружения беспилотных летательных аппаратов для обеспечения безопасности объектов и территорий.

2 В составе аппаратно-программных комплексов радиотехнического контроля и технической разведки для автоматического анализа радиосигнальной обстановки и выявления несанкционированных источников излучения.

3 В системах охраны критически важных объектов и инфраструктуры, включая промышленные предприятия, энергетические объекты и транспортные узлы.

4 В качестве основы для дальнейших научных исследований в области применения методов глубокого обучения к задачам анализа радиосигналов и временно-частотных представлений.

5 В образовательном процессе при подготовке специалистов в области цифровой обработки сигналов, искусственного интеллекта и разработки интеллектуальных систем анализа данных.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1-А. Стецко, В.Ю. Introduction to neural networks and deep learning / Н.Л. Боброва, В.Ю. Стецко, А.П. Харкевич // Актуальные вопросы современной науки и образования: материалы 33-ей международной научно-практической конференции. – Пенза, 2023. – с. 44-50.

2-А. Стецко, В.Ю. UAV recognition using a neural network / Н.Л. Боброва, В.Ю. Стецко, А.П. Харкевич // Развитие науки, общества и образования: актуальные вопросы теории и практики: материалы 18-ой международной научно-практической конференции. – Пенза, 2024. – с. 47-51.

3-А. Стецко, В.Ю. Применение модели YOLOv5 для детектирования БПЛА / Н.Л. Боброва, В.Ю. Стецко, А.П. Харкевич // Молодой учёный: материалы 11-ой международной научно-практической конференции. – Пенза, 2025. – с. 67-71.

4-А. Стецко, В.Ю. Система детектирования сигналов БПЛА на основе спектрограмм и YOLO в реальном времени / Н.Л. Боброва, В.Ю. Стецко, А.П. Харкевич // Большая студенческая конференция: материалы 13-ой международной научно-практической конференции. – Пенза, 2025. – с. 56-60.