

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.391

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ТОЧНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ БПЛА ПО ИХ РАДИОСИГНАЛАМ

С. А. Князьков¹, В.А. Зеленский²

¹ООО «КВАДРО КОД», г. Самара

²«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», г. Самара

Ключевые слова: БПЛА, классификация радиосигналов, RF-идентификация, глубокое обучение, системы реального времени, быстродействие.

Интенсивное внедрение БПЛА в гражданских и военных отраслях порождает комплекс задач по их автоматическому обнаружению и классификации. Основные исследуемые направления включают анализ визуальных образов, акустических и радиочастотных сигналов, а также данных, получаемых с помощью радиолокационных систем. Однако, данных подходов наталкивается на важное противоречие: необходимость соблюдения высокой точности приводит к использованию сложных вычислительных алгоритмов, в то время как задачи по распознаванию накладывают жёсткие рамки на время принятия решения.

Большинство БПЛА используют безлицензионный (как следствие общедоступный) ISM диапазон (433 МГц, 900 МГц, 2,4 ГГц и 5,8 ГГц), реализуя такие протоколы, как: Wi-Fi, FHSS, DSSS, а также проприетарные технологии (DJI OcuSync, ELRS и др.). Для задач последующей классификации сигналов БПЛА выделяют такие первичные признаки, как: временные, спектральные, временно-частотные (STFT-спектрограммы, вейвлет-разложение) или же сырые I/Q-данные. Однако, анализ этих признаков может быть сложной задачей для систем с ограниченными аппаратными ресурсами. В исследовании [1] же предлагается и экспериментально доказывается решение по классификации технологий на основе распределения RSSI, что позволяет обеспечить быстродействие на устройствах с ограниченными ресурсами, поскольку его анализ является простым и менее требовательным к системным ресурсам. На точность и быстродействие классификации также влияет количество отсчётов,

собранных для анализа, соответственно, необходимо искать компромисс между количеством данных и анализируемых признаков.

Среди методов классификации можно выделить следующие:

- сигнатурный анализ;
- машинное обучение;
- глубокие нейронные сети.

Сигнатурные методы являются методами с жёстким решением, а также с экспоненциальным ростом вычислительной сложности (предобработка, добавление на каждый новый признак свой эталон в базу, извлечение признаков, сравнение с эталоном, решение), поэтому большинство исследований сконцентрировано на возможностях применения более гибких нейросетевых алгоритмов, которые могут давать более точные результаты с лучшей способностью к обобщению. Такие архитектуры сетей, как CNN демонстрируют высокую точность [2], [3], [4] ценой возрастающих вычислительных затрат. Напротив, классические алгоритмы классификации, такие как: SVM, Random Forest, k-NN демонстрируют малые вычислительные затраты, однако теряют точность в задачах небинарной классификации, а также в сложных условиях, таких как низкий SNR (ОСШ) [5].

Исходя из вышеперечисленного можно сказать, что себя могут оправдать комбинированные подходы анализа инвариантных признаков, когда для генерации первичных гипотез используется алгоритм с низкой вычислительной сложностью, и, если решается, что гипотезы нуждаются в дополнительном подтверждении, то данная нагрузка перекладывается на более сложные алгоритмы, что в целом позволяет сохранить быструю реакцию и высокую точность системы.

Проблемой также является появление новых данных, так как повторное обучение модели на может быть довольно затратным по времени процессом, что является критическим аспектом при использовании в системах реального времени. Для решения данной проблемы успешно применяется подход с дообучением модели на новых данных, что позволяет гибко адаптировать нейросеть к новым данным и сохранять высокую точность при значительно меньшем времени обучения, что показано в исследовании [6].

Большинство исследований не уделяют внимание возможности работы алгоритмов на системах с ограниченными ресурсами, рассматривая лишь точность распознавания самих моделей на ограниченном наборе данных.

Задача оценки комплексного обеспечения быстродействия и точности также усложняется отсутствием какой-либо единой метрики.

Таким образом, комплексная оптимизация системы признаков и архитектуры классификатора с учётом ограничений целевой платформы является актуальной задачей, решение которой позволит строить

эффективные решения в системах с критическими требованиями к скорости и точности распознавания БПЛА по их радиосигналу.

Список использованных источников

1. Liu, W. Wireless Technology Recognition Based on RSSI Distribution at Sub-Nyquist Sampling Rate for Constrained Devices / W. Liu, M. Kulin, T. Kazaz [и др.]. – DOI 10.3390/s17092081. – Текст : электронный // Sensors. – 2017. – Т. 17, № 9. – 2081. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/9/2081A>
2. Ozturk, E. RF-Based Low-SNR Classification of UAVs Using Convolutional Neural Networks / E. Ozturk, F. Erden, I. Guvenc. – Текст : электронный // arXiv.org. – 2020. – arXiv:2009.05519. – URL: <https://arxiv.org/abs/2009.05519>
3. Zhao, Z. A Two-Dimensional Deep Network for RF-based Drone Detection and Identification Towards Secure Coverage Extension / Z. Zhao, Q. Du, X. Yao [и др.]. – Текст: электронный // IEEE Xplore. – 2023. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10333485>
4. Ozturk, E. RF-based low-SNR classification of UAVs using convolutional neural networks / E. Ozturk, F. Erden, I. Guvenc. – DOI 10.52953/QJGH3217. – Текст : электронный // ITU Journal on Future and Evolving Technologies. – 2021. – Т. 2, № 5. – С. 39–52. – URL: https://www.researchgate.net/publication/355660459_RF-based_low-SNR_classification_of_UAVs_using_convolutional_neural_networks
5. Ezuma, M. Micro-UAV Detection and Classification from RF Fingerprints Using Machine Learning Techniques / M. Ezuma, F. Erden, C. K. Anjinappa [и др.]. – DOI 10.1109/AERO.2019.8741970. – Текст : электронный // IEEE Xplore. – 2019. – URL: https://www.researchgate.net/publication/333923767_Micro-UAV_Detection_and_Classification_from_RF_Fingerprints_Using_Machine_Learning_Techniques
6. Berg, A. P. 15,500 Seconds: Lean UAV Classification Using EfficientNet and Lightweight Fine-Tuning / A. P. Berg, Q. Zhang, M. Y. Wang. – Текст : электронный // arXiv.org. – 2025. – arXiv:2506.11049. – URL: <https://arxiv.org/abs/2506.11049>

Князьков Сергей Александрович, аспирант гр. А1_02.02.08, инженер 2 кат. ООО «КВАДРО КОД», sergey-knyz@bk.ru

Зеленский Владимир Анатольевич, д.т.н., доцент, зав. каф. РЭС, zelenskiy.va@ssau.ru

УДК 004.738.5

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЯЧЕЙСТЫХ СЕТЕЙ НА БАЗЕ МОДУЛЯЦИИ LORA

Е.Р. Дубровин

«Самарский национальный исследовательский университет имени
академика С.П. Королёва», ООО «КВАДРО КОД», г. Самара

В связи со стремительным развитием концепции Интернета Вещей (IoT) в современном мире, постоянно появляются новые и развиваются уже существующие технологии для построения сетей, объединяющие и связывающие устройства-участники единой экосистемы между собой.