

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2025-2-26-35
УДК

Поступила: 13.10.2025г.
Сдана на рецензию: 14.10.2025г.
Подписана к печати: 21.10.2025г.

СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОДАВЛЕНИЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ БПЛА

Л.А. Киракосян

*Российско-Армянский (Славянский) университет
kirakosyan.lilia@student.rau.am*

АННОТАЦИЯ

В статье представлена интеллектуальная система радио мониторинга и противодействия БПЛА на базе программно-определяемого радио (ПОР). Система выполняет непрерывное сканирование радиодиапазона, классификацию сигналов с помощью СНС и при обнаружении управления или телеметрии БПЛА автоматически активирует модуль многочастотного подавления. Эксперименты показали точность классификации 97.82% и высокую эффективность селективного подавления.

Ключевые слова: радио мониторинг, классификация, БПЛА, ПОР, подавление радиосигналов.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят широкое применение в гражданских и военных сферах, включая мониторинг, картографирование, сельское хозяйство и поисково-спасательные операции. Вместе с тем их несанкционированное использование создает серьезные риски для безопасности и конфиденциальности, что требует развития систем автоматического обнаружения и противодействия.

Одним из наиболее перспективных решений являются программно-определяемые радиосистемы (ПОР) [1], обеспечивающие гибкую настройку приёма и обработки сигналов в широком диапазоне частот.

Существующие решения

Существует множество подходов к обнаружению и классификации радиосигналов, используемых БПЛА. В частности, в работах [2, 3] рассматриваются методы пассивного и активного радио мониторинга, реализуемые с помощью ПОР. Основными методами обнаружения являются анализ радиочастотной активности, идентификация по спектральным характеристикам сигналов. Такие подходы позволяют оперативно выявлять присутствие БПЛА в контролируемой зоне и оценивать характеристики канала управления.

Для классификации всё большую актуальность приобретают подходы на основе методов машинного обучения [4], [5] включая сверточные нейронные сети (СНС) и анализ спектрограмм [6]. Такие методы обеспечивают более высокую точность идентификации и устойчивость к помехам.

Для подавления сигналов используют классические методы, такие как широкополосное и узкополосное глушение [7]. Первое эффективно для разрыва канала управления БПЛА, но энергоёмкое; второе позволяет избирательно подавлять отдельные частоты и меньше влияет на легитимные сервисы, однако требует точного знания центральной частоты цели. Современные подходы, включающие протоколно-ориентированное подавление сигналов, при котором вмешательство синхронизируется с характерными пакетами или каналами передачи данных, что повышает эффективность и снижает нагрузку на систему.

Предлагаемый метод

В данной работе описывается разработанный алгоритм обнаружения, метод классификации и подавления сигналов БПЛА, выполненные на базе HackRF One [8] и Raspberry Pi 4 [9].

А. Обнаружение радиосигналов

В качестве метода обнаружения сигналов в разработанной системе используется метод обнаружения энергии [10]. Этот подход является простым, но эффективным и обеспечивает низкую вычислительную сложность при работе в реальном времени. Детектор энергии анализирует поток данных, поступающих с радиоприемника HackRF One, сравнивая измеренную мощность сигнала с установленным порогом, определяемым уровнем шума в полосе пропускания. Метод не требует детальной информации о структуре сигнала – достаточно задать центральную частоту и ширину полосы.

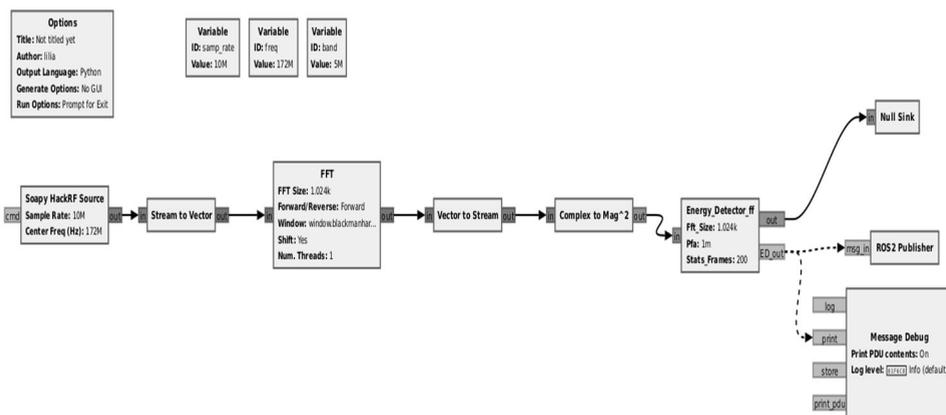


Рисунок 1. Блок-схема системы обнаружения радиосигналов.

Для реализации метода обнаружения энергии была разработана блок-схема (Рис. 1) в среде GNU Radio [11], обеспечивающая прием и анализ радиосигналов в реальном времени. Система осуществляет последовательное сканирование радиочастотного диапазона от 1 МГц до 6 ГГц с полосой пропускания 20 МГц.

Основным элементом системы является приемный модуль, взаимодействующий с устройством HackRF One и обеспечивающий настройку параметров приёма, таких как частота и полоса пропускания.

Полученный сигнал проходит преобразование Фурье с оконной функцией для снижения искажений, после чего вычисляется мощность, что позволяет определить наличие активности в выбранном диапазоне.

Для реализации алгоритма обнаружения был создан пользовательский блок `Energy_Detector_ff`, интегрированный в среду GNU Radio. Он использует частоту дискретизации и вероятность ложной тревоги для адаптации чувствительности детектора. Алгоритм вычисляет статистические параметры входного сигнала и формирует динамический порог обнаружения: если энергия превышает порог, то сигнал считается обнаруженным, в противном случае фиксируется отсутствие активности. Такой подход обеспечивает надежное выделение активных радиосигналов перед этапом классификации.

Б. Классификация радиосигналов

После обнаружения активного радиосигнала выполняется этап его классификации, основанный на анализе спектрограмм [12], полученных методом кратковременного преобразования Фурье (STFT) [13]. Такой подход позволяет представить сигнал во временно-частотной области и выделить его характерные признаки. Каждая спектрограмма имеет фиксированную длительность 0,25 с и используется в качестве входных данных для модели глубокого обучения.

Для обучения и тестирования алгоритмов была сформирована база данных, включающая 13 000 спектрограмм, относящихся к семи категориям. В набор входят сигналы управления и телеметрии БПЛА (DJI Mavic 3 [14], SIYI FT24 [15], Taranis X9D Plus [16], Holybro [17]), радиопомехи, а также сигналы мобильных сетей LTE, 3G и eSIM. Датасет разделён на обучающую, валидационную и тестовую выборки в пропорции 70:20:10.

Для классификации применялись современные архитектуры сверточных нейронных сетей ResNet-18 [18], EfficientNet-B0 [19] и MobileNetV3-Small [20]. Обучение моделей проводилось на GPU-системе (GeForce RTX 3060) с использованием оптимизатора Adam [21] и функции потерь кросс-энтропии. Каждая модель обучалась в течение

10 эпох при размере батча 5, что обеспечило стабильную сходимость и минимизацию переобучения. Сравнительный анализ показал (Табл. 1), ResNet18 обеспечивает оптимальное сочетание точности и эффективности: F1-score составляет 0.977, точность – 97.82%.

Таблица 1.

Результаты сравнительного анализа моделей классификации

Модель	F1 score macro avg	Точность %	Recall macro avg
Resnet18	0.977	97.82	0.979
EfficientNet-B0	0.992	99.25	0.991
MobileNetV3-Small	0.951	95.48	0.945

В. Глушение радиосигналов

Заключительным этапом разработанной системы является энергоэффективное подавление радиосигналов, выявленных как управляющие или каналы телеметрии БПЛА. Цель этого этапа воздействие на целевые радиоканалы БПЛА с минимальным влиянием на легитимные коммуникационные сервисы. Особую сложность представляет широкое применение в современных пультах управления технологии FHSS (frequency-hopping spread spectrum) [22]: частотные «прыжки» и быстрая перестройка несущей частоты требуют адаптивных и широкополосных методов противодействия, способных отслеживать динамику спектра и оперативно формировать помеху с согласованными характеристиками.

В среде GNU Radio были разработаны и экспериментально проверены различные методы подавления радиосигналов, охватывающие как базовые, так и протоколно-ориентированные подходы: широкополосный шум (Barrage), тональные и многотональные помехи (Tone и Multi-tone), сканирующее глушение (Sweep), Multi-tone Sweep, протоколно-сканирующие, а также предложенный в данной работе усо-

вершенствованный метод Multi-tone OFDM Sweep. Все методы функционируют в диапазоне частот от 1 МГц до 6 ГГц при полосе пропускания до 20 МГц.

Метод Multi-tone OFDM Sweep, объединяющий многотональную генерацию, согласование с OFDM-структурой [23] и динамическое частотное сканирование. На основе анализа спектра выделяются параметры целевого сигнала, после чего формируется набор OFDM-тонов, разнесённых по частоте с заданным шагом для усиления интермодуляционных эффектов [24]. Далее формируемая помеха последовательно перестраивается по диапазону, что повышает вероятность попадания в короткие частотные прыжки FHSS-систем.

Результаты

А. Экспериментальная установка

Для проведения экспериментов использовалась компактная система на базе Raspberry Pi 4, HackRF One, усилителя сигнала, антенн типа Yagi и коммутатора антенн. Raspberry Pi 4 Model B (Cortex-A72, 1.5 ГГц, 8 ГБ RAM) управляла SDR-устройством, запускала блок-схемы GNU Radio и записывала данные. Для тестирования был собран дрон с системой связи, включающей пульт управления SIYI FT24 и приёмник SIYI mini [15].

Б. Результаты экспериментов

Проведены эксперименты по обнаружению, классификации и глушению радиосигналов FPV-дрона. Обнаружение сигналов на дистанциях до 80 м подтвердило работоспособность системы. Для классификации спектрограмм тестировались все вышеперечисленные модели на Raspberry Pi 4; лучшим сочетанием времени обработки и использования памяти показала ResNet18, результаты показаны в Табл. 2. Во время реального тестирования в лаборатории наблюдалась корректная классификация сигналов со средней точностью 96,25%.

Таблица 2.

Результаты моделей классификации на Raspberry Pi 4

Модель	Время обработки 1 изображения	Использования памяти
Resnet18	0.296	627.34
EfficientNet-B0	0.394	523.018
MobileNetV3-Small	0.316	476.75

Были проведены лабораторные и полевые испытания методов глушения. В лабораторных условиях дрон находился на расстоянии 15 м от пульта управления и 2 м от системы глушения. В полевых экспериментах расстояние между глушителем и пультом составляло около 1 км, а до дрона – 20–30 м. Были зафиксированы и проанализированы значения RSSI [25], SNR [26] и потребление энергии для каждого метода глушения; измерения проводились с интервалом 10 минут, результаты приведены в Табл. 3.

Таблица 3.

Значения RSSI, SNR и потребление энергии в полевых и лабораторных условиях

Метод	Значение RSSI		Значение SNR		Потребление энергии
	Лаборатория	Поле	Лаборатория	Поле	
Barrage	25	70	-29	48	0.8
Tone	75	97	55	82	0.005
Multi-Tone	14	73	-34	51	0.09
Sweep	20	75	-12	61	0.07
Multi-Tone Sweep	10	65	-43	41	0.12
OFDM Sweep	8	70	-40	45	0.06
Multi-tone OFDM Sweep	3	50	-41	31	0.07

Анализ результатов показал, что при применении метода Multi-tone OFDM Sweep в полевых условиях достигается наименьшее значение RSSI и наибольшее значение SNR. Поскольку эффективность глушения повышается при увеличении SNR и снижении RSSI, данный метод демонстрирует наибольшую эффективность. При этом он также характеризуется относительно низким потреблением энергии, что делает его оптимальным выбором среди протестированных методов.

Заключение

Результаты работы подтверждают, что предложенные методы обеспечивают эффективное и контролируемое воздействие на управляющие каналы беспилотных систем при соблюдении энергетических и вычислительных ограничений. Архитектура ResNet18 показала наилучшие характеристики при классификации спектрограмм в реальном времени, что определяет ее как наиболее целесообразное решение для практического применения в составе встроенных систем мониторинга и противодействия.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Комитета по науке Республики Армения (исследовательские проекты № 23AA-1B009).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mitola J., Maguire G.Q.* Cognitive radio: making software radios more personal // Proc. IEEE Personal Communications. 1999. PP. 13–18.
2. *Matić V., Kosjer V., Lebl A., Pavić B., Radivojević J.* Methods for Drone Detection and Jamming // Proc. 10th International Conference on Information Society and Technology (ICIST), Kopaonik, 8–11 March 2020. P. 16–21.
3. *Slimeni F., Delleji T., Chtourou Z.* RF-Based Mini-Drone Detection, Identification & Jamming in No Fly Zones Using Software Defined Radio // Proc. International Conference on Computational Collective Intelligence (ICCCI), Hammamet, Tunisia, 28–30 September 2022. Springer, 2022. PP. 791–798.
4. *O’Shea T., Hoydis J.* An Introduction to Deep Learning for the Physical Layer // IEEE Trans. on Cognitive Communications and Networking. 2017. Vol. 3, No. 4. P. 563–575. DOI: 10.1109/TCCN.2017.2758370.

5. Gast M. 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide. Vol. 1, 2nd ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2005. 284p. ISBN 0596100523.
6. Podder P., Zawodniok M., Madria S. Deep Learning for UAV Detection and Classification via Radio Frequency Signal Analysis // Proc. IEEE Int. Conf. on Mobile Data Management. IEEE, 2024. P. 165–174. DOI: 10.1109/MDM61037.2024.00040.
7. Grover K., Lim A., Yang Q. Jamming and anti-jamming techniques in wireless networks: a survey // International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing. 2014. Vol. 17, No. 4. P. 197–215.
8. Great Scott Gadgets. HackRF One – Software Defined Radio. Available at: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/> (accessed 16.10.2025).
9. Upton E., Halfacree G. Raspberry Pi 4 User Guide. Wiley, 2019.
10. Cabric D., Mishra S., Brodersen R. Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios. Berkeley: Berkeley Wireless Research Center, University of California, 2004.
11. GNU Radio Foundation. GNU Radio — The Free & Open Software Radio Ecosystem. Available at: <https://www.gnuradio.org/> (accessed 16.10.2025).
12. Tektronix. Understand RF Spectrograms. Tech Brief 48W-73795-0. Available at: https://download.tek.com/document/Understand-RF-Spectrograms_%20Tech%20Brief_48W-73795-0.pdf (accessed 16.10.2025).
13. Allen J., Rabiner L. A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis // Proc. IEEE. 1977. Vol. 65, No. 11. PP. 1558–1564. DOI: 10.1109/PROC.1977.10770.
14. DJI. Mavic 3 – Product Support. Available at: <https://www.dji.com/global/support/product/mavic-3> (accessed 16.10.2025).
15. SIYI Technology. FT24 Radio Control System. Available at: <https://www.siyi.biz/ft24/> (accessed 16.10.2025).
16. FrSky Electronic Co. Taranis X9 Lite and X9D Plus – OpenTX Radio Systems. Available at: <https://www.frsky-rc.com> (accessed 16.10.2025).
17. Holybro. Telemetry and Radio Systems. Available at: <https://holybro.com> (accessed 16.10.2025).
18. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition // Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.
19. Tan M., Le Q. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks // Proc. of the 36th Int. Conf. on Machine Learning (ICML). 2019. Vol. 97. P. 6105–6114.
20. Howard A., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. arXiv preprint, 2017. Available at:

- <https://arxiv.org/abs/1704.04861> (accessed 16.10.2025).
21. *Kingma D., Ba J.* Adam: A Method for Stochastic Optimization // Proc. 3rd Int. Conf. on Learning Representations (ICLR). 2015. Available at: <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (accessed 16.10.2025).
 22. *Adamy D.* EW 101: A first course in electronic warfare. Artech House, Boston, 2001. 352p.
 23. *Litwin L., Pugel M.* The principles of OFDM // RF signal processing. 2001. Vol. 2. PP. 30–48.
 24. *Матюшков А.Л., Сенюк В.О., Ступин К.В.* Алгоритм радиоэлектронного подавления радиостанций с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2019. № 1(119). СС. 5–10.
 25. *Mohsin H., Abdulameer K., Khudhair Z.* Study and performance analysis of received signal strength indicator (RSSI) in wireless communication systems // International Journal of Engineering and Technology. 2017. Vol. 6, No. 1. PP. 195–200.
 26. *Pärilin K.* Jamming of spread spectrum communications used in UAV remote control systems. Tallinn University of Technology, School of Information Technologies, Thomas Johann Seebeck Department of Electronics, 2017.

SYSTEM FOR DETECTION AND INTELLIGENT SUPPRESSION OF UAV COMMUNICATION CHANNELS

L. Kirakosyan

Russian-Armenian University

ABSTRACT

The paper presents an intelligent UAV radio monitoring and countermeasure system based on software-defined radio (SDR). The system performs continuous spectrum scanning, signal classification using a convolutional neural network (CNN), and automatically activates a multiband jamming module upon detection of UAV control or telemetry signals. Experimental results demonstrated a classification accuracy of 97.82% and high efficiency of selective jamming.

Keywords: radio monitoring, classification, UAV, SDR, radio signal jamming.