

Дифференциация сигналов БПЛА и фоновых источников в диапазоне 2,4 ГГц на основе совокупности спектральных признаков

Б.В. Безсмертный, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (НГАСУ) (Сибстрин), старший преподаватель кафедры информационных систем и технологии; immortal@sibstrin.ru

П.А. Ковалев, НГАСУ (Сибстрин), студент 3 курса; p.kovalev@sibstrin.ru

И.И. Павлов, НГАСУ (Сибстрин), доцент кафедры информационных систем и технологии, к. т. н.; iipavlov02@mail.ru

УДК 621.396.96

DOI: 10.34832/ELSV.2026.79.5.004

Аннотация. В статье исследуются методы пассивной радиотехнической дифференциации сигналов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и фоновых источников в диапазоне 2,4 ГГц в условиях интенсивного радиоэлектронного окружения. Разработан интегрированный алгоритм обнаружения и классификации сигналов БПЛА, основанный на объединении энергетического критерия, анализа циклического префикса OFDM-сигналов и анализа частотного переключения, и проведена его экспериментальная оценка. Экспериментальная апробация алгоритма проводилась на записях сигналов БПЛА, Wi-Fi и фоновых источников ISM-диапазона. Выполнена статистическая оценка вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги на сформированном наборе экспериментальных IQ-записей. Показано, что интеграция спектральных признаков обеспечивает повышение устойчивости классификации по сравнению с применением отдельных методов, особенно в условиях плотного Wi-Fi-трафика и многолучевого распространения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке низкозатратных систем радиоконтроля и предварительного выявления присутствия БПЛА на основе SDR-платформ.

Ключевые слова: БПЛА, радиоконтроль, спектрально-временной анализ, обнаружение радиосигналов, циклический префикс, OFDM, FHSS, SDR, ISM-диапазон 2,4 ГГц.

Для цитирования: Безсмертный, Б.В. Дифференциация сигналов БПЛА и фоновых источников в диапазоне 2,4 ГГц на основе совокупности спектральных признаков / Б.В. Безсмертный, П.А. Ковалев, И.И. Павлов // Электросвязь. – 2026. – № 5. – С. 36-44.

ВВЕДЕНИЕ

Рост распространения беспилотных летательных аппаратов обусловил актуальность разработки средств их обнаружения и классификации пассивными радиотехническими методами [1–3]. Значительная часть коммерческих БПЛА функционирует в нелицензируемом диапазоне 2,4 ГГц, используемом также устройствами Wi-Fi, Bluetooth и другими источниками промышленного, научного и медицинского назначения (ISM-диапазон) [4–6]. Это приводит к высокой плотности радиоэлектронного фона и усложняет задачу достоверной идентификации сигналов управления и передачи данных БПЛА.

В задачах спектрального мониторинга традиционно применяются энергетические детекторы [7, 8], методы анализа циклического префикса OFDM-сигналов [9–12] и алгоритмы выявления режимов псевдослучайного переключения частоты (Frequency-Hopping Spread Spectrum, FHSS) [13]. Каждый из указанных подходов обладает ограниченной устойчивостью при работе в условиях многолучевого распространения, высокой загрузки Wi-Fi-каналов и низкого отношения сигнал/шум (SNR) [1, 2, 8, 14]. В частности, энергетические методы не обеспечивают селективности по типу источника [7], анализ циклического префикса чувствителен к ис-

кажениям временной структуры сигнала [9], а признаки частотного переключения могут проявляться в ряде фоновых режимов передачи [13].

Следовательно, задача надежной дифференциации сигналов БПЛА в диапазоне 2,4 ГГц требует интеграции нескольких независимых диагностических признаков и формализации решающего правила классификации.

В настоящей работе предложен интегрированный алгоритм, объединяющий энергетический критерий [7], анализ циклического префикса OFDM [9, 12] и анализ частотного переключения сигнала [13]. Алгоритм реализован на базе программно-определяемого приемника HackRF One [15] и ориентирован на обработку широкополосных записей в реальных условиях радиоэлектронного окружения.

Научная новизна работы заключается в формализации процедуры интеграции спектральных признаков и в экспериментальной статистической оценке эффективности предложенного подхода по критериям вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги.

Практическая значимость состоит в возможности применения разработанного алгоритма в составе низкозатратных систем радиоконтроля и предварительного выявления присутствия БПЛА на основе SDR-платформ [3, 15].