УДК: 621.396.969:623.746

А. А. Коломієць

РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ВИЯВЛЕННЯ БПЛА ЗА ДОПОМОГОЮ АКТИВНОЇ РЛС

Анотація. *У роботі розглянуто актуальність підвищення ефективності та достовірності виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з використанням активних радіолокаційних станцій (РЛС) в умовах складного завадового стану та масованого застосування пасивних перешкод. Проаналізовано проблематику функціонування оглядових активних РЛС під час виявлення малоконтрастних повітряних цілей із наднизькою ефективною поверхнею розсіювання (ЕПР) на тлі відбитків від підстилаючої поверхні землі, місцевих предметів, метеоутворень та дипольних відбивачів. Встановлено, що стандартні режими зондування та традиційні методи міжперіодної обробки не забезпечують необхідної ймовірності виявлення через spectral overlap завадового фону та корисного сигналу БПЛА. Запропоновано комплексний підхід щодо модернізації обробки сигналів у активній РЛС, який базується на адаптивному виборі параметрів зондувальних сигналів, багаточастотному когерентному накопиченні та аналізі мікродоплерівських портретів цілей. Визначено перспективні напрями подальших досліджень щодо інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в траєкторну обробку радіолокаційної інформації.*

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, активна РЛС, радіолокаційне виявлення, пасивні перешкоди, ефективна поверхня розсіювання, селекція рухомих цілей, когерентне накопичення, мікродоплерівський спектр.*

Abstract. *The paper considers the relevance of improving the efficiency and reliability of detecting small-sized unmanned aerial vehicles (UAVs) using active radar stations (RS) under complex clutter and intense passive interference conditions. The problems of operation of active surveillance radars during the detection of low-contrast air targets with an ultra-low radar cross-section (RCS) against the background of reflections from the underlying surface, local objects, weather conditions, and dipole reflectors are analyzed. It was established that traditional inter-period processing and moving target indication methods do not provide the required detection probability due to spectral overlap of clutter background and useful UAV signal. A comprehensive approach to modernizing signal processing in active radars is proposed, based on adaptive waveform selection, multi-frequency coherent integration, and analysis of micro-Doppler target profiles. Promising directions for further research on the integration of neural network classifiers into real-time radar processing are identified.*

Keywords: *unmanned aerial vehicle, active radar, radar detection, passive interference, radar cross-section, moving target indication, coherent integration, micro-Doppler spectrum.*

У сучасних умовах ведення бойових дій та швидкого розвитку засобів повітряного нападу критичного значення набувають питання забезпечення високонадійного та своєчасного виявлення повітряних цілей системами протиповітряної оборони та радіолокаційної розвідки. Масоване застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різного класу — від малорозмірних розвідувальних мультироторних систем до ударних баражуючих боєприпасів — суттєво змінило характер протиповітряного бою. На озброєнні Повітряних Сил Збройних Сил України наразі перебувають як радіолокаційні станції (РЛС) попередніх поколінь, так і новітні активні РЛС із цифровими антенними решітками, надані країнами-партнерами. Забезпечення ефективності їх бойового застосування безпосередньо залежить від здатності активних РЛС виявляти малорозмірні повітряні об'єкти в складних завадових умовах. Основна складність радіолокаційного виявлення БПЛА за допомогою активної РЛС полягає в тому, що більшість із них належать до класу малоконтрастних цілей із наднизькою ефективною поверхнею розсіювання (ЕПР $\sigma \approx$ 0,001...0,1 м²), малими робочими висотами польоту та незначними радіальними швидкостями. Ситуація значно ускладнюється в умовах активної дії пасивних перешкод різного походження: відбиттів від підстилаючої поверхні (рельєфу місцевості, водної поверхні), місцевих предметів та забудови, метеоутворень (хмар, дощу), а також штучно створених дипольних хмар. Потужність сумарного завадового фону у багатьох випадках на 20...40 дБ перевищує рівень відбитого сигналу від БПЛА. Традиційні методи селекції рухомих цілей (СРЦ) зазнають суттєвого зниження ефективності через флуктуації спектра пасивних перешкод (наприклад, через коливання кроп дерев від вітру або знос диполів), що призводить

до «засліплення» каналів виявлення та критичного зростання рівня хибних тривог.

Експлуатація активної РЛС в умовах високоінтенсивних пасивних перешкод вимагає переходу від класичних одноканальних методів фільтрації до комплексних багатометричних вимірювальних систем. Для подолання вказаних проблем у наукових працях ХНУПС ім. Івана Кожедуба обґрунтовано необхідність адаптації параметрів зондувальних сигналів та структури їх обробки до оточного завадового стану. У даній доповіді розглядається удосконалений комплексний метод підвищення виявлення БПЛА активною РЛС, який полягає у поетапному застосуванні адаптивної міжперіодної селекції, когерентного накопичення та аналізу мікродоплерівського ефекту від обертових елементів планера БПЛА.

Сутність запропонованого підходу полягає у формуванні багатовимірного ознакового простору розрізнення сигналів цілей та пасивних перешкод. На першому етапі здійснюється адаптивна режеція пасивних завад із використанням багатовузлових фільтрів, нулі діаграми спрямованості та спектральної характеристики яких автоматично перебудовуються відповідно до оціненого доплерівського спектра пасивної перешкоди. На другому етапі застосовується зондування складномодульованими пачками імпульсів з фазокодовою маніпуляцією (ФКМ) або лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) та довготривалим когерентним накопиченням. Це дає змогу підвищити відношення сигнал/перешкода додатково на 10…12 дБ за рахунок стиснення сигналів та збільшення енергетичного потенціалу активної РЛС.

Особливу увагу приділено виділенню мікродоплерівських складових у спектрі відбитого сигналу. Навіть у випадках, коли планер БПЛА рухається з малою радіальною швидкістю або зависає в повітрі (що унеможливлює його селекцію звичайною системою СРЦ), обертання гвинтів та лопатей силової установки створює специфічну мікродоплерівську модуляцію сигналу. Застосування часово-частотного перетворення Вігнера-Вілля або вейвлет-аналізу дає змогу впевнено ідентифікувати наявність БПЛА на тлі стаціонарних або повільно рухомих пасивних завад.

Перспективним напрямом подальших досліджень є визначення оптимальної частоти переключення режимів зондування та впровадження алгоритмів штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання класів БПЛА на основі накопичених баз даних радіолокаційних портретів у реальному часі.

Список використаних джерел:

1. Захарченко М. В. Цифрова обробка сигналів: підручник / М. В. Захарченко, В. М. Бріцин, О. В. Корнієнко. Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2018. — 284 с.
2. Костроміцький О. І. Основи побудови та функціонування радіолокаційних систем: навчальний посібник /О. І. Костроміцький, В. М. Морозов. — Харків: ХНУПС ім. Івана Кожедуба, 2017. — 212 с.
3. Клімов О. М. Радіоелектронні системи та засоби зенітних ракетних комплексів: підручник / О. М. Клімов, В. І. Смирнов. — Харків: ХНУПС ім. Івана Кожедуба, 2019. — 340 с.
4. Перов О. І. Теоретичні основи радіолокації та радіонавігації: підручник / О. І. Перов, М. І. Зайцев. — Київ: НАУ, 2020. — 416 с.
5. Жук С. Я. Адаптивна обробка сигналів у радіотехнічних системах: монографія / С. Я. Жук, І. О. Товкач. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. — 256 с.

Коломієць Антон Андрійович — курсант Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: antonkolomiets34@gmail.com.

Kolomiiets Anton Andriiovych — cadet at the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, 77/79 Sumska St., postcode 61023, e-mail: antonkolomiets34@gmail.com.