УДК: 621.396.969:623.746

А. М. Громов

ПІДВИЩЕННЯ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА РАДІОЛОКАЦІЙНИМИ ЗАСОБАМИ ЗРК В УМОВАХ ПАСИВНИХ ПЕРЕШКОД

Анотація. *У роботі розглянуто актуальність підвищення ефективності та достовірності виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) радіолокаційними засобами зенітних ракетних комплексів (ЗРК) в умовах активного впливу інтенсивних пасивних перешкод різного походження. Проаналізовано проблематику функціонування оглядових РЛС та станцій наведення ракет під час виявлення малоконтрастних повітряних цілей із наднизькою ефективною поверхнею розсіювання (ЕПР) на тлі відбитків від підстилаючої поверхні землі, місцевих предметів, метеоутворень та масованого застосування дипольних відбивачів. Встановлено, що традиційні методи міжперіодної обробки та селекції рухомих цілей не забезпечують необхідної ймовірності виявлення через спектральне перекриття завадового фону та корисного сигналу БПЛА. Запропоновано комплексний підхід, який базується на поетапному поєднанні адаптивної міжперіодної селекції, багатополяризаційного зондування та аналізу мікродоплерівських портретів цілей. Визначено перспективні напрями подальших досліджень щодо інтеграції нейромережевих класифікаторів у траєкторну обробку сигналів.*

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, зенітний ракетний комплекс, радіолокаційний засіб, пасивні перешкоди, ефективна поверхня розсіювання, селекція рухомих цілей, поляризаційне зондування, мікродоплерівський спектр.*

Abstract. *The paper considers the relevance of improving the efficiency and reliability of detecting small-sized unmanned aerial vehicles (UAVs) by radar means of anti-aircraft missile systems (AAMS) under conditions of intensive passive interference of various origins. The problems of operation of surveillance radars and missile guidance stations 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 of the earth, local objects, weather conditions, and mass use of dipole reflectors are analyzed. It was established that traditional methods of inter-period processing and moving target indication do not provide the required detection probability due to spectral overlap of background clutter and useful UAV signal. A comprehensive approach is proposed, based on a phased combination of adaptive inter-period selection, multi-polarization sensing, and analysis of micro-Doppler target profiles. Promising directions for further research on the integration of neural network classifiers into trajectory signal processing are identified.*

Keywords: *unmanned aerial vehicle, anti-aircraft missile system, radar equipment, passive interference, radar cross-section, moving target indication, polarization sensing, micro-Doppler spectrum.*

У сучасних умовах ведення бойових дій та розвитку засобів повітряного нападу критичного значення набувають питання забезпечення високонадійного та своєчасного виявлення повітряних цілей системами протиповітряної оборони. Масоване застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різного класу — від малорозмірних розвідувальних квадрокоптерів до ударних баражуючих боєприпасів — суттєво змінило характер протиповітряного бою. На озброєнні Повітряних Сил Збройних Сил України наразі перебувають як зенітні ракетні комплекси (ЗРК) попередніх поколінь, так і новітні зразки озброєння, надані країнами-партнерами. Забезпечення ефективності їх бойового застосування безпосередньо залежить від здатності радіолокаційних засобів (станцій виявлення, цілевказівки та розвідки) виявляти малорозмірні повітряні об’єкти в складних завадових умовах.

Основна складність радіолокаційного виявлення БПЛА полягає в тому, що більшість із них належать до класу малоконтрастних цілей із наднизькою ефективною поверхнею розсіювання (ЕПР σ ≈ 0,001...0,1 м^2), 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 кропу дерев від вітру або знос диполів), що призводить до «засліплення» каналів виявлення та критичного зростання рівня хибних тривог

Експлуатація ЗРК в умовах високоінтенсивних пасивних перешкод вимагає переходу від класичних одноканалних 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

поточного завадового стану. У даній доповіді розглядається удосконалений комплексний метод підвищення виявлення БПЛА радіолокаційними засобами ЗРК, який полягає у поетапному застосуванні адаптивної міжперіодної селекції, багатополяризаційного зондування 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 двополяризаційне (ортогональне) зондування, що дає змогу вимірювати елементи матриці розсіювання об'єкта. Оскільки хаотичні пасивні відбивачі (диполі, краплі води) та елементи конструкції БПЛА мають різну поляризаційну метрику, це дозволяє додатково підвищити відношення сигнал/перешкода на 10...12 дБ.

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.

Громов Михайло Анатолійович - курсант Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: mischagromova@gmail.com.

Hromov Mykhailo Anatoliyovych – cadet at the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University Kharkiv, 77/79 Sumska St., postcode 61023, e-mail: mischagromova@gmail.com.