УДК: 621.396.96:623.746

І. П. Кондрашев

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИЯВЛЕННЯ МІКРО БПЛА ЗА ДОПОМОГОЮ МІЛІМЕТРОВОЇ РЛС

Анотація. *У роботі розглянуто актуальність досліджень щодо підвищення ефективності виявлення та розпізнавання малорозмірних мікро-БПЛА з використанням радіолокаційних станцій (РЛС) міліметрового діапазону радіохвиль (Ka- та W-діапазонів). Проаналізовано особливості формування ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) мікро-БПЛА у міліметровому діапазоні довжин хвиль, а також вплив гідрометеорів та затухання в атмосфері на дальність дії РЛС. Встановлено, що застосування міліметрових хвиль дає змогу суттєво підвищити роздільну здатність за дальністю та кутовими координатами, що забезпечує деталізацію радіолокаційного портрета цілі. Запропоновано спосіб обробки сигналів на основі надвисокої роздільної здатності та виділення унікальних мікродоплерівських спектральних ознак від обертання мініатюрних роторів. Визначено перспективні напрями подальших досліджень щодо інтеграції міліметрових РЛС у мультиспектральні комплекси протидії мікро-БПЛА.*

Ключові слова: *мікро-БПЛА, міліметровий діапазон радиохвиль, активна РЛС, ефективна поверхня розсіювання, мікродоплерівський спектр, роздільна здатність, радіолокаційний портрет.*

Abstract. *The paper considers the relevance of research on improving the efficiency of detection and recognition of small-sized micro-UAVs using millimeter-wave (MMW) radar systems operating in Ka- and W-bands. The features of micro-UAV radar cross-section (RCS) formation in the MMW range, as well as the impact of hydrometeors and atmospheric attenuation on radar operational range, are analyzed. It was established that the use of millimeter waves significantly increases range and angular resolution, ensuring high detail of the target's radar profile. A signal processing method based on ultra-high resolution and extraction of unique micro-Doppler spectral features induced by miniature rotor rotation is proposed. Promising directions for further research on integrating MMW radars into multispectral counter-micro-UAV systems are identified.*

Keywords: *micro-UAV, millimeter-wave radar, radar detection, radar cross-section, micro-Doppler spectrum, spatial resolution, radar profile.*

У сучасних умовах ведення локальних військових конфліктів та забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури особливої гостроти набула проблема протидії малорозмірним безпілотним літальним апаратам класу «мікро» та «нано». Здатності таких БПЛА здійснювати приховане спостереження та коригування вогню на надмалих висотах висувають надзвичайно високі вимоги до засобів радіолокаційного виявлення. Традиційні РЛС сантиметрового та дециметрового діапазонів стикаються із серйозними обмеженнями під час виявлення мікро-БПЛА через низьку роздільну здатність та малу величину відбитого сигналу.

Основна складність виявлення даної категорії цілей полягає у наднизьких значеннях їх ефективної поверхні розсіювання (ЕПР $\sigma \approx 0{,}0001...0{,}01$ м²), обумовлених широким використанням композитних радіопрозорих матеріалів та мініатюрними габаритами планера. Використання міліметрового діапазону радіохвиль (зокрема частот 35 ГГц та 94 ГГц) дозволяє суттєво зменшити довжину хвилі λ до кількох міліметрів, що переводить характер розсіювання елементів конструкції мікро-БПЛА у резонансну та оптичну області. Це забезпечує зростання ЕПР окремих відбивальних centers цілі порівняно з сантеметровим діапазоном та формує чіткий радіолокаційний портрет.

Застосування міліметрових РЛС також забезпечує формування надзвичайно вузьких діаграм спрямованості антени при помірних її габаритах, що суттєво підвищує кутову роздільну здатність та захищеність від відбиттів від підстилаючої поверхні землі. Разом з тим, ключовим обмеженням міліметрового діапазону є підвищене затухання радіохвиль в атмосфері та додаткові втрати у метеоутвореннях (дощ, туман). У наукових працях ХНУПС ім. Івана Кожедуба обґрунтовано доцільність застосування імпульсно-доплерівських сигналів із широкою смугою частот для досягнення роздільної здатності за дальністю на рівні одиниць сантиметрів.

У даній доповіді запропоновано спосіб підвищення достовірності виявлення мікро-БПЛА, який полягає у поєднанні алгоритмів надвисокої роздільної здатності за дальністю з аналізом високочастотних мікродоплерівських складових спектра відбитого сигналу. Через високу несучу частоту міліметрової РЛС навіть невисока лінійна швидкість кромки лопатей мініатюрних електродвигунів викликає значний доплерівський зсув частоти, що формує унікальний мікродоплерівський «підпис» мікро-БПЛА, який чітко вирізняється на тлі стаціонарних завад від рослинності.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка алгоритмів автоматичної класифікації мікро-БПЛА на основі згорткових нейронних мереж, які аналізують двовимірні часово-частотні спектрограми сигналів міліметрової РЛС 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. 4. Перов О. І. Теоретичні основи радіолокації та радіонавігації: підручник / О. І. Перов, М. І. Зайцев. — Київ: НАУ, 2020. — 416 с. 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.

Кондрашев Ілля Павлович *— курсант Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: Illkondrashev@gmail.com.*

Kondrashev Illya Pavlovych *— cadet at the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, 77/79 Sumska St., postcode 61023, e-mail: Illkondrashev@gmail.com.*