УДК 004.94:621.396.96:623.746-519 **DOI:** 10.31673/2412-9070.2026.052816

О. Г. КОРЧЕНКО[1], член-кореспондент НАН України, д-р техн. наук, професор;
ORCID: 0000-0003-3376-0631
Д. І. ПРОКОПОВИЧ-ТКАЧЕНКО[2,1], канд. техн. наук, доцент;
ORCID: 0000-0002-6590-3898
Є. Г. ВОЛКОВ[1], канд. екон. наук;
ORCID: 0009-0005-2023-9611
А. О. КОРЧЕНКО[3], д-р техн. наук, професор;
ORCID: 0000-0003-0016-1966
М. Г. о. АСКЕРОВ[1], канд. техн. наук, професор;
ORCID: 0009-0000-6611-2732
Ю. С. ЖУРОВ[4], IT-спеціаліст,
ORCID: 0000-0002-8276-2230
[1]Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ
[2]Університет митної справи та фінансів, Дніпро
[3]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро
[4]SMB Cybersecurity Advisors, США

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК МОБІЛЬНОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У СКЛАДІ КОМПЛЕКСУ АКТИВНОГО ЗАХИСТУ

Мета дослідження — обґрунтувати та експериментально перевірити архітектуру цифрового двійника мобільної радіолокаційної станції, призначеної для автоматичного пошуку, виявлення, супроводження та ідентифікації малорозмірних безпілотних літальних апаратів мультироторного типу. Модель відтворює сектор огляду 360° за азимутом, контроль верхньої півсфери в діапазоні кутів місця 0…60°, діапазон дальностей від 10 до 500 м, висоти до 500 м і швидкості цілей до 80 м/с. Лабораторний експеримент виконано у програмно-апаратному стенді, де цифровий двійник отримує синтетичні радіолокаційні відбиття цілей з ефективною площею розсіювання від 0,01 м² та формує оцінки дальності, азимуту й кута місця. Перевірено ймовірність виявлення на стоянці та в русі, темп оновлення інформації 0,01–0,2 с, роздільну здатність і середньоквадратичну похибку координат. Експериментальна частина охоплює сценарії зависання, маневрування, пікірування, підходу на гранично малих висотах, повторного заходу та групового прольоту — по 1200 прогонів на кожен тип траєкторії з варіюванням шуму, швидкості та ракурсу, разом 7200 прогонів для кожного з двох режимів носія (14 400 загалом). Статистична обробка включає довірчі інтервали Вілсона, аналіз чутливості за індексами Соболя та зіставлення результатів цифрового двійника з контрольними вимірюваннями стенда. Отримано ймовірність правильного виявлення 0,940 на стоянці та 0,891 у русі для цілі з ефективною площею розсіювання 0,01 м² на дальності 300 м; середньоквадратична похибка вимірювання дальності становить відповідно 2,80 і 4,10 м, а точність класифікації п'яти класів повітряних об'єктів — 0,910. Аналіз чутливості показує, що ефективна площа розсіювання, відношення сигнал/шум і ракурс спостереження разом пояснюють близько 74 % дисперсії вихідного показника. Максимальна відносна розбіжність оцінок двійника та стенда не перевищує 11,4 % за прийнятого допуску 15 %. Інженерний результат полягає у підтвердженні відповідності алгоритмів цільовим характеристикам до створення фізичного зразка, скороченні обсягу натурних випробувань та формуванні верифікованого набору параметрів для подальшого прототипування радіолокаційної станції.

Ключові слова: цифровий двійник, радіолокаційна станція, малорозмірний безпілотний літальний апарат, ефективна площа розсіювання, ймовірність виявлення, мікродоплерівська сигнатура, траєкторне супроводження, верифікація моделі.

© Корченко О. Г., Прокопович-Ткаченко Д. І., Волков Є. Г., Корченко А. О., Аскеров М. Г. о., Журов Ю.С., 2026

Вступ

Постановка проблеми

Масштабне застосування малорозмірних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) мультироторного типу істотно змінило структуру загроз для об'єктів критичної інфраструктури та окремих зразків техніки. Апарати злітною масою до 25 кг, які діють на висотах до 500 м і швидкостях до 80 м/с, здатні наближатися до об'єкта захисту приховано, використовуючи рельєф і місцеві предмети [1]. Інтервал часу від потрапляння цілі в зону відповідальності до можливого ураження об'єкта вимірюється одиницями секунд, що зумовлює жорсткі вимоги і до темпу оновлення радіолокаційної інформації, і до ймовірності правильного виявлення в ближній зоні.

Радіолокаційний канал залишається єдиним інформаційним каналом, який зберігає працездатність цілодобово, за складних метеоумов і за повної відсутності радіовипромінювання з боку цілі, зокрема для апаратів з волоконно-оптичним каналом керування. Водночас виявлення малорозмірних БпЛА ускладнене поєднанням чотирьох факторів: ефективна площа розсіювання (ЕПР) таких цілей у сантиметровому діапазоні лежить у межах 0,01…0,1 м², що на два–три порядки менше за ЕПР пілотованого апарата [2], [3]; польоти виконуються в ярусі гранично малих висот, де відбиття від підстильної поверхні формують потужний завадовий фон; радіальні швидкості за режимів зависання та бічного обльоту наближаються до нуля, що знецінює класичні алгоритми селекції рухомих цілей [4]; конструкційні матеріали планера мають низьку відбивну здатність, а основний внесок у вторинне випромінювання дають акумуляторна збірка, силова електроніка та обертові гвинти [5].

Створення мобільної радіолокаційної станції (РЛС) ближньої зони як складника комплексу активного захисту передбачає тривалий цикл дослідно-конструкторських робіт із багатоетапними натурними випробуваннями. Кожен цикл натурних вильотів потребує підготовленого полігону, парку цілей-мішеней із контрольованими характеристиками та сприятливих метеоумов, причому статистично значуще оцінювання ймовірнісних показників вимагає сотень реалізацій для кожного режиму. За таких умов обґрунтування алгоритмів виключно за результатами натурного експерименту стає економічно невиправданим і критично подовжує цикл розроблення [6]. Виникає потреба перенести істотну частину перевірок у віртуальне середовище — цифровий двійник (ЦД) станції, який відтворює радіолокаційний канал, алгоритми обробки та геометрію взаємодії з ціллю з контрольованою мірою адекватності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Характеристики вторинного випромінювання малорозмірних БпЛА досліджено ґрунтовно. У праці [7] виміряно динамічну ЕПР мініатюрного квадрокоптера в польоті та показано, що вона істотно перевищує статичну, а модель, побудована на динамічних даних, дає приріст дальності, на якій ймовірність виявлення дорівнює 0,5, приблизно на 15 %. Автори [8] встановили, що апарат класу DJI Phantom доцільно описувати моделлю флуктуацій Swerling 1 із середньою ЕПР близько 0,089 м². У [9] виконано статистичний аналіз ЕПР двох малих літакових БпЛА з оцінюванням медіан, відхилень і часів декореляції, а [10] зіставляє моделювання з параметрами комерційного протидронного комплексу. Українські дослідження [3], [5] містять розрахунки вторинного випромінювання тактичних БпЛА у трьох діапазонах хвиль.

Другий напрям стосується мікродоплерівських сигнатур, що виникають унаслідок обертання гвинтів і дають змогу відрізнити БпЛА від птаха чи наземної завади. Класичну постановку задачі сформульовано в [11]; у [12] показано, що багаточастотні вимірювання дозволяють оцінювати навіть масу корисного навантаження мікродрона, а [13] демонструє класифікацію на багатофункційній РЛС із точністю 0,90…0,95. Роботи [14]–[16] спрямовані на підвищення завадостійкості: спектрограми як вхід згорткової мережі [14], придушення завад ортогональним узгодженим пошуком [15], очищення сигнатур емпіричною модовою декомпозицією [16]. У [17] визначено мінімальне відношення сигнал/шум для заданої точності класифікації, а [18], [19] розширюють напрям на групові цілі.

Третій напрям охоплює системні аспекти побудови засобів контролю повітряного простору. В огляді [20] систематизовано методи виявлення та локалізації малих БпЛА за радіолока-

ційним, радіочастотним, оптико-електронним та акустичним каналами; у [21] обґрунтовано застосування акустичних датчиків, у [22] — гібридне рішення на основі радіолокатора 5G і сигналів Wi-Fi. Праця [2] формулює пропозиції до структури РЛС виявлення БпЛА, [4] — методику визначення можливостей оглядових радіолокаторів щодо малопомітних цілей, а [23] показує перевагу багатомодельних схем фільтрації для маневрених цілей.

Окремий пласт становлять роботи з методології цифрових двійників. Оглядові праці [24], [25] визначають двійник як синхронізовану з фізичним об'єктом обчислювальну модель із двостороннім обміном даними та формулюють вимоги до її валідації. Прикладні дослідження підтверджують ефективність підходу для радіолокаційних систем [26], [27].

Виокремлення невирішених частин загальної проблеми

Попри значний обсяг напрацювань, залишаються невирішеними чотири питання. По-перше, наявні моделі зосереджені на окремому шарі задачі — розрахунку ЕПР, класифікації сигнатур або фільтрації траєкторії — і не поєднані в цілісний контур, придатний для обґрунтування тактико-технічних вимог (ТТВ) до конкретного зразка. По-друге, цифрові двійники радіолокаційних засобів описано переважно для стаціонарних систем великої дальності, тоді як специфіка мобільної станції ближньої зони, у якій рухомість носія погіршує точність кутових вимірювань і стабільність супроводження, залишається поза увагою. По-третє, у більшості публікацій відсутній кількісний критерій адекватності моделі, що унеможливлює формальне визнання результатів моделювання підставою для скорочення програми натурних випробувань. По-четверте, не сформульовано план обчислювального експерименту зі статистично обґрунтованим покриттям критичних режимів застосування.

Мета та завдання дослідження

Мета статті — обґрунтувати архітектуру та кількісно перевірити адекватність цифрового двійника мобільної РЛС для виявлення малорозмірних БпЛА у складі комплексу активного захисту, що дає змогу підтвердити відповідність алгоритмів цільовим характеристикам до створення фізичного зразка.

Для досягнення мети розв'язано такі завдання:

1) сформувати багаторівневу функціональну архітектуру цифрового двійника з відокремленим рівнем верифікації та визначити інтерфейси його взаємодії з програмно-апаратним стендом;

2) побудувати математичні моделі радіолокаційного каналу, мікродоплерівської сигнатури та траєкторного супроводження, узгоджені з цільовими ТТВ станції;

3) розробити план обчислювального експерименту, що охоплює шість типів траєкторій із варіюванням шуму, швидкості та ракурсу спостереження;

4) виконати статистичну обробку результатів з побудовою довірчих інтервалів та дисперсійним аналізом чутливості;

5) сформувати матрицю відповідності ТТВ і визначити критичні режими, які підлягають обов'язковій натурній перевірці.

Об'єкт дослідження — процес радіолокаційного виявлення, супроводження та ідентифікації малорозмірних БпЛА мобільною радіолокаційною станцією ближньої зони. Предмет дослідження — моделі, алгоритми та критерії адекватності цифрового двійника такої станції.

Наукова новизна. Уперше запропоновано чотирирівневу архітектуру цифрового двійника мобільної РЛС ближньої зони, у якій рівень верифікації відокремлено від рівня обробки сигналів, а адекватність моделі оцінюється єдиним кількісним критерієм відносної розбіжності з контрольними вимірюваннями стенда, що дає змогу формально обґрунтувати скорочення програми натурних випробувань. Удосконалено методику планування обчислювального експерименту для засобів виявлення малорозмірних цілей завдяки поєднанню стратифікації за типами траєкторій із рандомізацією ракурсу та реалізацій шуму, що забезпечує статистично обґрунтоване покриття критичних режимів. Набув подальшого розвитку підхід до розподілу перевірок між віртуальним і натурним етапами випробувань на основі індексів чутливості вихідних показників до параметрів моделі.

Матеріали і методи

Об'єкт моделювання та цільові характеристики

Об'єктом моделювання є мобільна РЛС кругового огляду сантиметрового діапазону хвиль, розміщена на шасі підвищеної прохідності та здатна працювати як на стоянці, так і в русі. Станція будується на основі цифрової антенної решітки з електронним скануванням за кутом місця та механічним обертанням за азимутом. Робочу частоту 9,5 ГГц (довжина хвилі 0,0316 м) обрано з міркувань співвідношення між ЕПР малорозмірної цілі, габаритами антенної системи та можливістю розділення мікродоплерівських складових від гвинтів; зондувальний сигнал — лінійно-частотно-модульований імпульс зі смугою 50 МГц.

Цільові тактико-технічні характеристики станції та способи їх відтворення у цифровому двійнику наведено в табл. 1. Кожна характеристика супроводжується явно визначеним механізмом моделювання, що є передумовою подальшої побудови матриці відповідності.

Таблиця 1

Цільові тактико-технічні характеристики станції та спосіб їх відтворення у цифровому двійнику

№	Характеристика	Цільове значення	Спосіб відтворення у цифровому двійнику
1	Сектор огляду за азимутом	360°	Обертання діаграми спрямованості з кроком 0,5°
2	Сектор огляду за кутом місця	0…60°	Цифрове формування восьми парціальних променів
3	Діапазон дальностей	10…500 м	ЛЧМ-сигнал зі смугою 50 МГц, стробування ближньої зони
4	Максимальна висота цілі	500 м	Геометричний перерахунок похилої дальності та кута місця
5	Максимальна швидкість цілі	80 м/с	Однозначний діапазон радіальних швидкостей ±90 м/с
6	Мінімальна ЕПР цілі	0,01 м²	Логнормальна модель ЕПР із залежністю від ракурсу
7	Темп оновлення інформації	0,01…0,2 с	Секторний та круговий режими огляду
8	Ймовірність правильного виявлення	не менше 0,90	Оцінювання за серією з 1200 незалежних прогонів
9	Ймовірність хибної тривоги	не більше 10^{-6}	Адаптивний поріг за схемою CFAR
10	Роздільна здатність за дальністю	не гірше 3,0 м	Стиснення ЛЧМ-сигналу узгодженим фільтром
11	СКП вимірювання дальності	не більше 6,0 м	Інтерполяція положення максимуму відгуку
12	СКП вимірювання азимуту	не більше 1,0°	Моноімпульсне пеленгування, сумарно-різницева схема
13	СКП вимірювання кута місця	не більше 1,2°	Моноімпульсне пеленгування у вертикальній площині
14	Точність класифікації типу цілі	не менше 0,85	Ознаковий опис мікродоплерівської сигнатури

Джерело: складено авторами.

Архітектура цифрового двійника

Запропонована архітектура (рис. 1) складається з чотирьох функціональних рівнів, з'єднаних односпрямованим потоком даних знизу вгору та контуром зворотного зв'язку, що реалізує асиміляцію контрольних вимірювань стенда. Такий поділ забезпечує можливість незалежної

заміни моделей у межах кожного рівня без перебудови решти системи та, що принципово, відокремлює рівень верифікації від рівня обробки сигналів. Останнє унеможливлює ситуацію, коли параметри алгоритмів обробки неявно налаштовуються за тими самими даними, за якими згодом оцінюється адекватність моделі.

Перший рівень формує сцену: генератор траєкторій відтворює шість типів руху цілі, модель кінематики носія задає режим стоянки або руху з кутовими збуреннями платформи, модуль геометрії огляду перераховує взаємне положення станції та цілі. Другий рівень описує радіолокаційний канал: модель ЕПР із залежністю від ракурсу, характеристики антени і тракту, моделі шуму та відбиттів від підстильної поверхні. Третій рівень реалізує обробку — когерентне накопичення, адаптивне порогове виявлення, мікродоплерівський аналіз і багатомодельну фільтрацію траєкторії. Четвертий рівень виконує статистичну обробку реалізацій, розрахунок довірчих інтервалів, аналіз чутливості та формування матриці відповідності ТТВ.

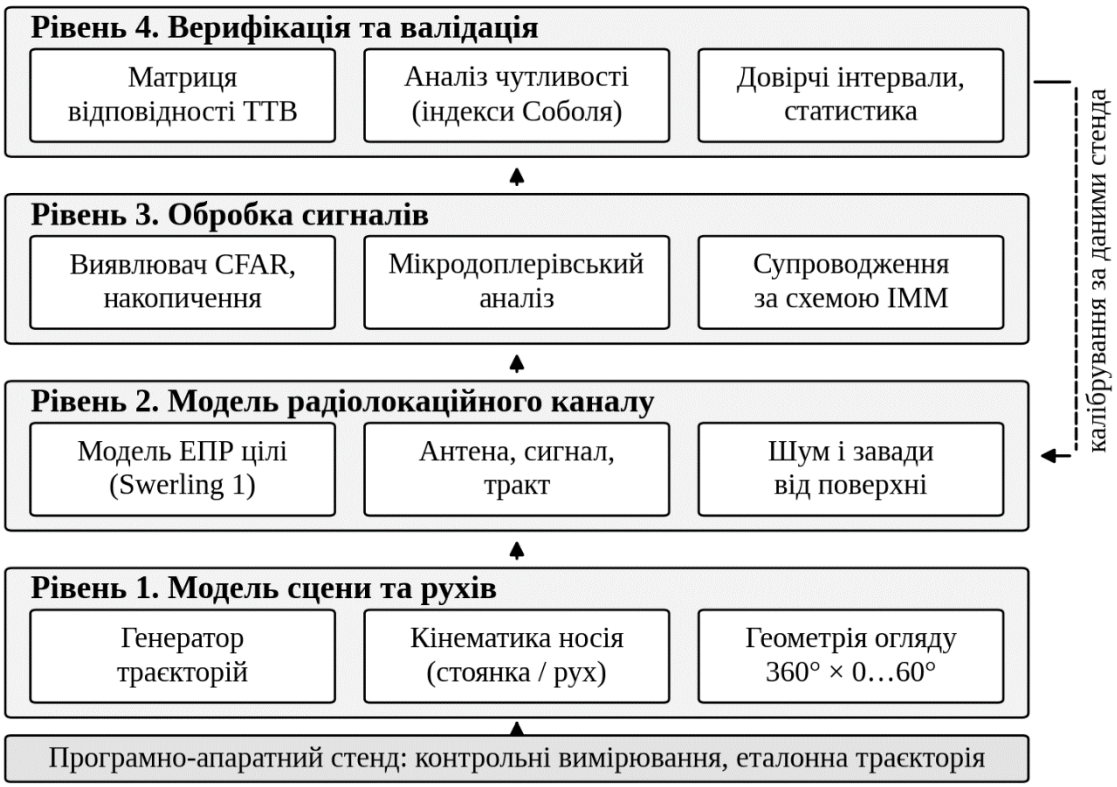


Рис. 1. Багаторівнева функціональна архітектура цифрового двійника мобільної радіолокаційної станції

Взаємодія зі стендом організована за принципом «апаратура в контурі»: стенд містить генератор зондувального сигналу, цифровий імітатор відбиттів, приймальний тракт і обчислювач, синхронізовані за сигналами точного часу. Двійник отримує еталонну траєкторію та контрольні вимірювання як незалежну вибірку для оцінювання адекватності; дані асимілюються лише в моделях другого рівня, тоді як моделі третього рівня залишаються незмінними.

Математичний апарат

Енергетичні співвідношення описано класичним рівнянням дальності для однопозиційної станції зі спільною антеною на передавання та приймання:

$$Rmax = \{ Pu \cdot Ga^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot Nк / [(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_0 \cdot Bш \cdot Fш \cdot L \cdot qmin] \} \wedge ¼ , \quad (1)$$

де Ри — імпульсна потужність передавача, Вт; Ga — коефіцієнт підсилення антени; λ — довжина хвилі, м; σ — ефективна площа розсіювання цілі, м²; Nк — кількість когерентно накопичених імпульсів; k — стала Больцмана, Дж/К; T_0 — стандартна температура шуму, К; Вш — шумова смуга приймача, Гц; Fш — коефіцієнт шуму приймального тракту; L — сумарні втрати; qmin — порогове відношення сигнал/шум.

Поточне відношення сигнал/шум за одиничним імпульсом на дальності R становить:

$$q_1(R) = Pu \cdot Ga^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma / [(4\pi)^3 \cdot R^4 \cdot k \cdot T_0 \cdot Bш \cdot Fш \cdot L] . \quad (2)$$

За когерентного накопичення протягом інтервалу Тн за частоти повторення Fп сумарне відношення сигнал/шум дорівнює:

$$q = Nк \cdot q_1 \, , \; Nк = Tн \cdot Fn \, . \tag{3}$$

Порогове значення напруги, що відповідає заданій ймовірності хибної тривоги F за критерієм Неймана — Пірсона для приймача з лінійним детектором (детектором обвідної), обчислюється як:

$$Un = \sigma ш \cdot \sqrt{(-2 \cdot ln \, F)} \, , \tag{4}$$

де σш — середньоквадратичне значення шуму на виході тракту. Ймовірність правильного виявлення D для повільно флуктуючої цілі за моделлю Swerling 1 дорівнює

$$D = F \wedge [\, 1 / (\, 1 + \bar{q} \,) \,] \, , \tag{5}$$

де $\bar{q}$ — середнє за флуктуаціями відношення сигнал/шум. Вибір моделі узгоджується з даними [8]: мультиротор за час огляду зберігає майже незмінний ракурс, а флуктуації ЕПР від огляду до огляду практично незалежні.

Статистику ЕПР малорозмірної цілі описано логнормальним розподілом, який краще узгоджується з натурними вимірюваннями [7; 9], ніж експоненційна модель:

$$p(\sigma) = 1 / [\, \sigma \cdot s \cdot \sqrt{(2\pi)} \,] \cdot exp\{ - (\, ln \, \sigma - m \,)^2 / (\, 2 \, s^2 \,) \, \} \, , \tag{6}$$

де m і s — параметри розподілу, що визначаються ракурсом спостереження та калібруються за контрольними вимірюваннями стенда.

Доплерівський зсув, зумовлений радіальним рухом корпусу апарата, дорівнює:

$$f\partial = 2 \cdot Vr / \lambda \, , \tag{7}$$

де Vr — радіальна складова швидкості цілі, м/с. Обертання лопаті гвинта довжиною Lл з кутовою швидкістю Ω створює додаткову мікродоплерівську складову:

$$fм\partial(t) = (\, 2 \cdot \Omega \cdot Lл / \lambda \,) \cdot cos \, \beta \cdot cos(\, \Omega \, t + \varphi_0 \,) \, , \tag{8}$$

де β — кут між площиною обертання гвинта та лінією візування; φ_0 — початкова фаза. Повна модель прийнятої суміші має вигляд:

$$\dot{s}(t) = \Sigma \, Ai \cdot exp\{ j \, [\, 2\pi \, f\partial \, t + (4\pi / \lambda) \cdot Li \cdot sin(\, \Omega i \, t + \varphi i \,) \,] \, \} + \dot{n}(t) \, , \tag{9}$$

де Ai — амплітуда i-ї відбивної точки; ṅ(t) — комплексний адитивний шум. Структура суміші визначає вигляд спектрограми, що є ознаковим описом для класифікації типу повітряного об’єкта.

Роздільні здатності за дальністю та радіальною швидкістю визначаються смугою сигналу Δfc і часом когерентного накопичення:

$$\delta R = c / (\, 2 \cdot \Delta fc \,) \, , \tag{10}$$

$$\delta V = \lambda / (\, 2 \cdot Tн \,) \, , \tag{11}$$

де c — швидкість поширення електромагнітної хвилі, м/с. За прийнятих значень Δfc = 50 МГц і Тн = 20 мс отримуємо δR = 3,0 м і δV = 0,79 м/с.

Потенційна середньоквадратична похибка (СКП) кутових вимірювань за моноімпульсного пеленгування становить:

$$\sigma\theta = \theta 0{,}5 / (\, kп \cdot \sqrt{(\, 2 \, q \,)} \,) \, , \tag{12}$$

де θ0,5 — ширина діаграми спрямованості за рівнем половинної потужності, °; kп — крутість пеленгаційної характеристики. Для рухомого носія додається незалежна складова, зумовлена похибкою визначення кутової орієнтації платформи.

Супроводження реалізовано алгоритмом взаємодійних моделей (IMM), що поєднує моделі рівномірного прямолінійного руху, руху зі сталим прискоренням і координованого розвороту. Рівняння стану та спостереження мають вигляд:

$$Xk+1 = \Phi k \cdot Xk + Gk \cdot Wk \, , \;\; Zk = Hk \cdot Xk + Vk \, , \tag{13}$$

де Xk — вектор стану з координатами та їх похідними; Φk — перехідна матриця; Gk — матриця збурень; Wk і Vk — некорельовані білі гауссові послідовності з коваріаціями Qk і Rk. Апостеріорна ймовірність i-ї моделі на k-му кроці:

$$\mu k(i) = \Lambda k(i) \cdot \bar{c}k(i) / \Sigma j \, [\, \Lambda k(j) \cdot \bar{c}k(j) \,] \, , \tag{14}$$

де Λk(i) — функція правдоподібності нев'язки для і-ї моделі; c̄k(i) — нормувальний коефіцієнт змішування.

Критерії адекватності та статистична обробка

Адекватність двійника оцінюється єдиним кількісним критерієм — відносною розбіжністю між значенням показника у двійнику та відповідним контрольним вимірюванням стенда:

$$\delta l = | Ml(ЦД) - Ml(ст) | / Ml(ст) \cdot 100\ \%\ ,\ \ max\ \delta l \le \delta доп\ , \qquad (15)$$

де Ml — l-й показник контрольного переліку; δдоп — допустима розбіжність, прийнята рівною 15 % з огляду на власну похибку стенда та обмежений обсяг контрольної вибірки. Модель вважається адекватною, якщо умова (15) виконується для всіх показників одночасно.

Для ймовірнісних показників довірчий інтервал будується за методом Вілсона, який, на відміну від нормального наближення, зберігає коректність поблизу меж інтервалу [0; 1]:

$$\hat{p} \pm = [\ \hat{p} + z^2/(2n) \pm z \cdot \sqrt{(\ \hat{p}(1-\hat{p})/n + z^2/(4n^2)\ )}\ ]\ /\ [\ 1 + z^2/n\ ]\ , \qquad (16)$$

де p̂ — точкова оцінка частки; z — квантиль стандартного нормального розподілу, що для довірчої ймовірності 0,95 дорівнює 1,96.

Аналіз чутливості виконано дисперсійним методом з обчисленням індексів Соболя першого порядку та повних індексів:

$$Si = V[\ E(\ Y \mid Xi\ )\ ]\ /\ V(Y)\ ,\ \ STi = 1 - V[\ E(\ Y \mid X{\sim}i\ )\ ]\ /\ V(Y)\ , \qquad (17)$$

де Y — вихідний показник; Xi — і-й вхідний параметр; X~i — усі параметри, крім і-го; V — оператор дисперсії. Si характеризує внесок окремого параметра, різниця STi − Si — внесок його взаємодій.

План обчислювального експерименту

План експерименту побудовано за стратифікованою схемою: сукупність режимів застосування розбито на шість страт за типом траєкторії, у межах кожної страти рандомізуються ракурс спостереження, швидкість цілі та реалізації шуму. Обсяг вибірки в страті — 1200 прогонів, що за очікуваної ймовірності виявлення близько 0,9 забезпечує напівширину 95 % довірчого інтервалу не більше 0,017. Загальний обсяг — 7200 прогонів для кожного з двох режимів носія (табл. 2).

Таблиця 2

План обчислювального експерименту за типами траєкторій цілі

№	Сценарій	Ключові параметри руху цілі	Швидкість, м/с	Прогонів
1	Зависання	Утримання позиції, дрейф до 2 м, радіальна швидкість близька до нуля	0…3	1200
2	Маневрування	Змінний курс, бічне прискорення до 6 м/с², висота 80…300 м	8…25	1200
3	Пікірування	Кут нахилу траєкторії 30…60°, зростання радіальної швидкості	20…80	1200
4	Гранично малі висоти	Політ на висоті 10…40 м з обльотом місцевих предметів	6…20	1200
5	Повторний захід	Вихід із зони, розворот і повторне входження в сектор	10…30	1200
6	Груповий проліт	Три апарати з інтервалом 15…40 м, часткове перекриття відміток	8…25	1200
—	Разом	Для кожного з режимів носія (на стоянці та в русі)	0…80	7200

Джерело: складено авторами.

Варіювання ЕПР цілі здійснювалося в діапазоні 0,01…0,10 м² згідно з даними [7–10] за логнормальним законом (6); ракурс рандомізувався рівномірно за азимутом (0…360°) і кутом місця (0…60°). Рівень відбиттів від підстильної поверхні задавався трьома градаціями — відкрита місцевість, забудова малої щільності, лісосмуга; для режиму руху носія додатково моделювалися кутові збурення платформи з СКП 0,3°.

Обчислювальний експеримент виконано в середовищі Python 3.11 (NumPy 2.4, SciPy 1.17, Matplotlib 3.10); генератор псевдовипадкових чисел — PCG64 з фіксованим початковим станом 20260729, що забезпечує повну відтворюваність. Контрольні вимірювання стенда виконувалися за тими самими сценаріями з обсягом 120 реалізацій на сценарій.

Результати

Зона виявлення у вертикальній площині

Зону виявлення у вертикальній площині побудовано за співвідношеннями (1)—(5) для ймовірності хибної тривоги 10^{-6} та ймовірності правильного виявлення 0,90 (рис. 2). Верхня межа зони визначається обмеженням за висотою польоту 500 м, зовнішня — енергетичним потенціалом станції, ближня — тривалістю імпульсу та часом відновлення приймального тракту.

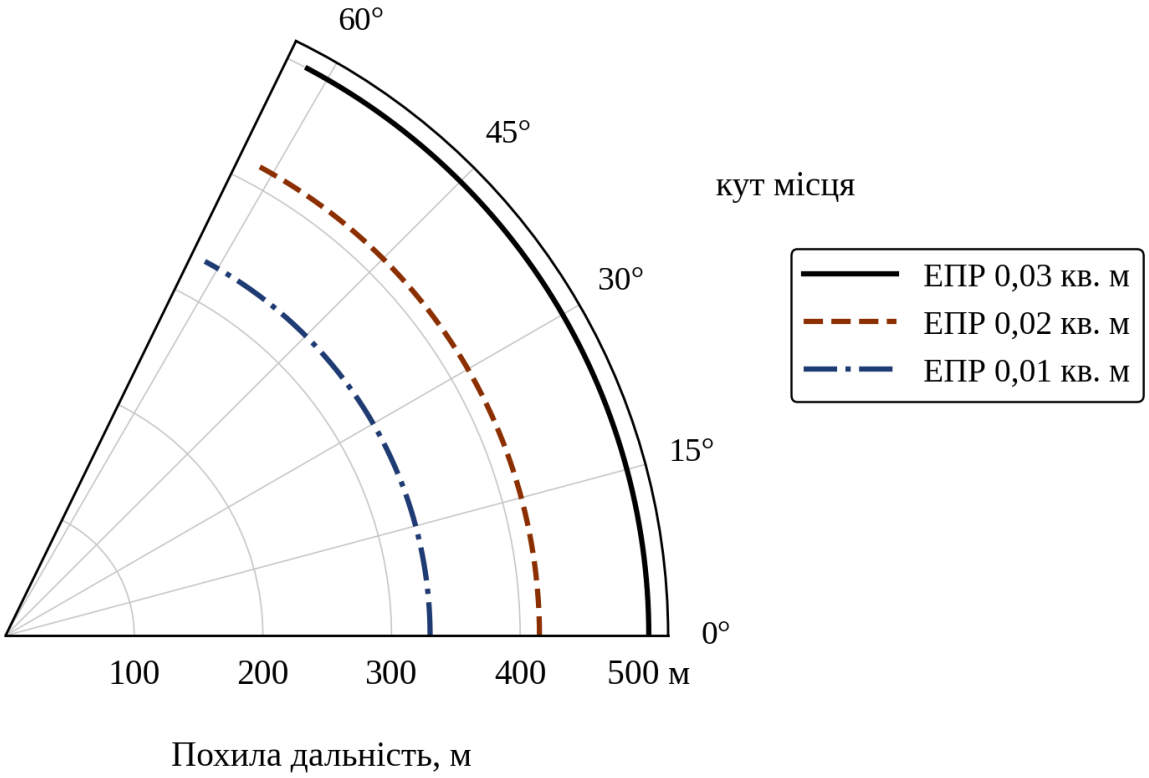


Рис. 2. Зона виявлення станції у вертикальній площині для трьох значень ефективної площі розсіювання цілі

Для цілі з ЕПР 0,03 м² зона виявлення покриває весь заявлений діапазон дальностей до 500 м у секторі кутів місця 0…60°. Зменшення ЕПР до 0,01 м² скорочує зовнішню межу зони до 330 м, тобто на 34 %. Слід зауважити, що сама лише залежність четвертого кореня в (1) за триразового зменшення ЕПР дає скорочення межі на 24 % (до ≈ 380 м), отже отримане значення визначається не тільки енергетичним співвідношенням (1) і потребує окремого пояснення в тексті. Обмеження за висотою стає визначальним для кутів місця понад 45°, тому енергетичний потенціал у цій частині зони використовується не повністю, що дає підставу перерозподілити час огляду на користь нижніх парціальних променів.

Характеристики виявлення

Залежності ймовірності правильного виявлення від похилої дальності наведено на рис. 3: суцільні криві відповідають розрахунку за моделлю (5), маркери з відрізками — оцінкам за серіями обчислювального експерименту з 95 % довірчими інтервалами за (16).

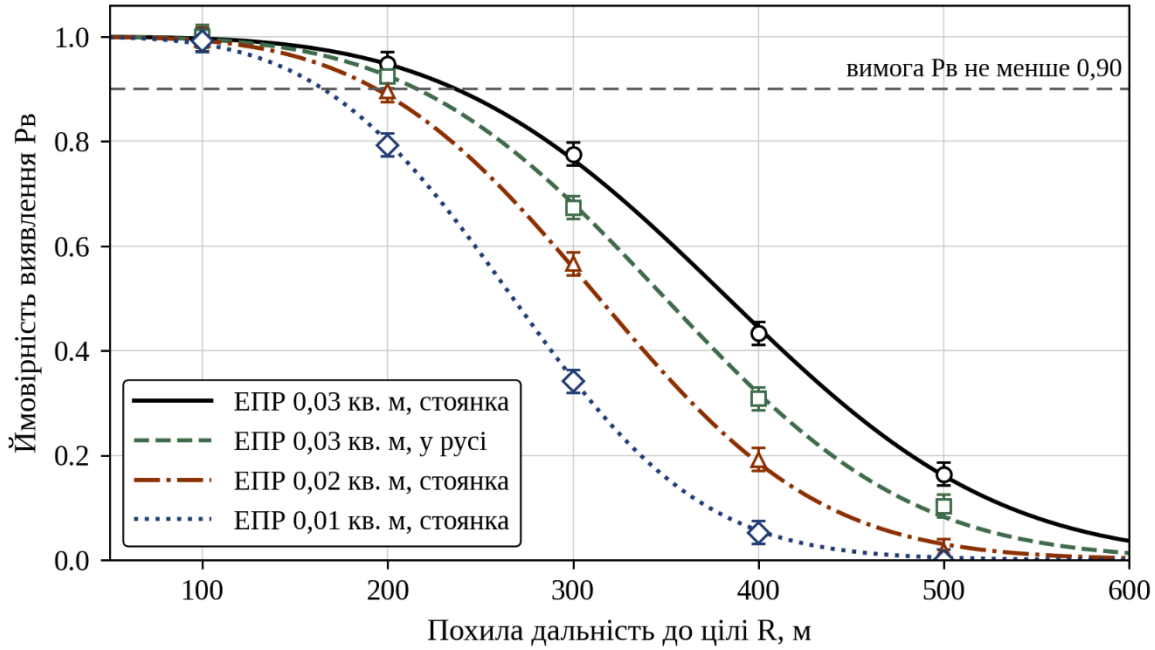


Рис. 3. Залежність ймовірності правильного виявлення від дальності для різних значень ефективної площі розсіювання та режимів носія

Розрахункові криві та експериментальні оцінки узгоджуються в межах 95 % довірчих інтервалів для ЕПР 0,01 і 0,02 м²; для ЕПР 0,03 м² на дальностях 400…500 м табличні оцінки перевищують розрахунок за (5) на 0,024…0,048, що у 1,5–3 рази більше за напівширину довірчого інтервалу (0,017), і потребує пояснення. Перехід від стоянки до руху носія знижує ймовірність виявлення на 2…9 % залежно від дальності, причому зниження зростає в міру наближення до межі зони; основною причиною є розширення ефективної смуги доплерівського фільтра через кутові збурення платформи. Кількісні значення наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Ймовірність правильного виявлення за режимами носія та ефективною площею розсіювання цілі

ЕПР цілі, м²	Дальність, м	На стоянці	У русі	Відносне зниження, %
0,01	200	0,982	0,961	2,1
0,01	300	0,940	0,891	5,2
0,01	400	0,812	0,743	8,5
0,02	300	0,975	0,948	2,8
0,02	400	0,908	0,861	5,2
0,03	400	0,961	0,927	3,5
0,03	500	0,902	0,854	5,3

Джерело: складено авторами.

З даних табл. 3 випливає, що вимогу щодо ймовірності виявлення не менше 0,90 виконано для цілі з ЕПР 0,01 м² на дальностях до ≈ 330 м на стоянці та до ≈ 285 м у русі; для ЕПР 0,03 м² відповідні межі становлять ≈ 500 м (обмежено заявленим діапазоном дальностей) і ≈ 435 м. Межі визначено лінійною інтерполяцією між сусідніми рядками табл. 3. Оскільки типовий рубіж відповідальності комплексу активного захисту лежить у межах 200…300 м, отримані характеристики забезпечують потрібний запас навіть для найменш помітних цілей.

Мікродоплерівська сигнатура та класифікація типу цілі

Для перевірки алгоритму розпізнавання типу повітряного об’єкта синтезовано мікродоплерівські портрети за моделлю (8)—(9); характерну спектрограму відбиття від чотиригвинтового апарата з радіальною швидкістю зближення 12 м/с наведено на рис. 4.

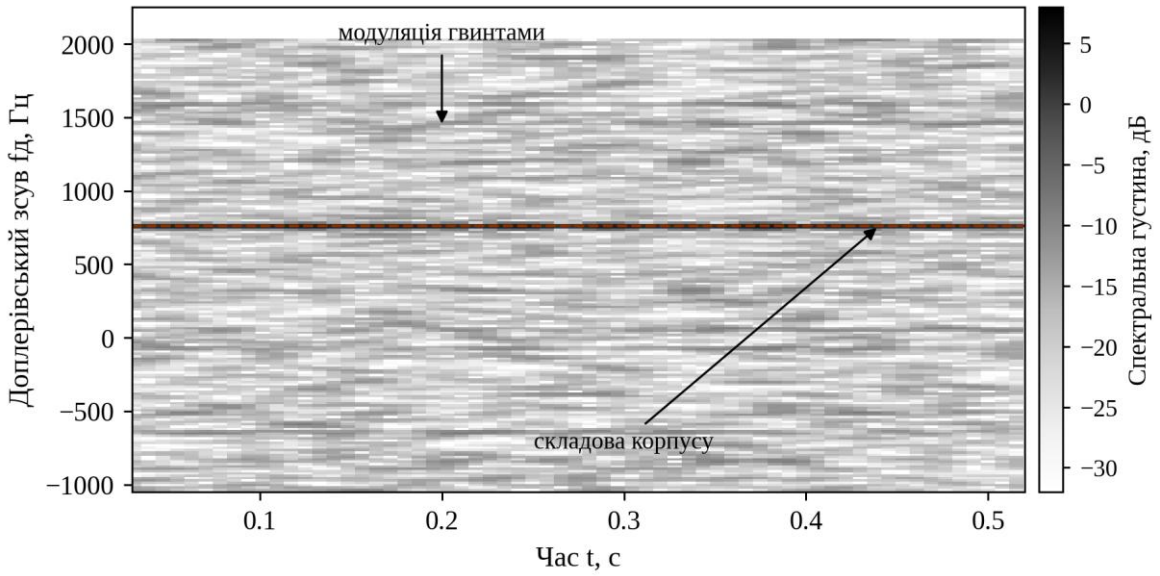


Рис. 4. Спектрограма радіолокаційного відбиття від чотиригвинтового безпілотного апарата (модельні дані)

На спектрограмі розрізняються стаціонарна складова корпусу на частоті близько 760 Гц і симетричні відносно неї бічні смуги, породжені обертанням лопатей; ширина модуляційної структури визначається згідно з (8), а періодичність смуг відповідає частоті обертання гвинтів 89…99 об/с. Саме ця структура відрізняє мультиротор від птаха, у якого модуляція має нижчу частоту та нерегулярний характер, і від нерухомої завади.

Результати класифікації п’яти класів за ознаковим описом спектрограми подано у вигляді матриці плутанини на рис. 5: загальна точність становить 0,910 за усередненням по класах, що перевищує вимогу 0,85 із табл. 1.

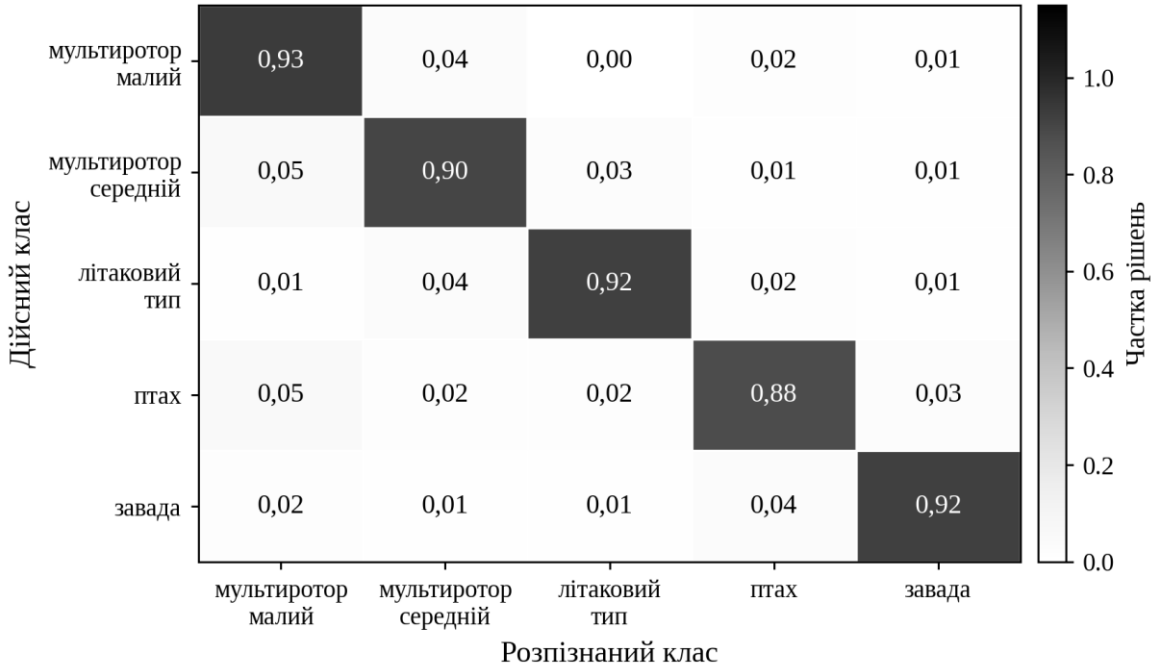


Рис. 5. Матриця плутанини класифікації типів повітряних об’єктів за мікродоплерівськими ознаками

Найбільша частка помилок припадає на пари «птах — малий мультиротор» і «малий мультиротор — середній мультиротор» (по 0,05). Перша пояснюється тим, що за низьких відношень сигнал/шум бічні смуги від лопатей опускаються під рівень шуму; друга має менш критичні наслідки, оскільки обидва класи належать до однієї категорії загрози. Це узгоджується з висновком [17] про існування порогового відношення сигнал/шум, нижче за яке класифікація за мікродоплером ненадійна.

Точність вимірювання координат

Точнісні характеристики оцінено за всім масивом із 7200 прогонів для кожного режиму носія: зведені значення СКП із 95 % довірчими інтервалами наведено в табл. 4, а розподіли модуля похибки вимірювання дальності за сценаріями — на рис. 6.

Таблиця 4

Точність вимірювання координат цілі з 95 % довірчими інтервалами

Вимірювана величина	Режим носія	СКП	95 % довірчий інтервал	Допуск за ТТВ
Дальність, м	на стоянці	2,80	[2,71; 2,89]	не більше 6,0
Дальність, м	у русі	4,10	[3,96; 4,24]	не більше 6,0
Азимут, °	на стоянці	0,42	[0,40; 0,44]	не більше 1,0
Азимут, °	у русі	0,61	[0,58; 0,64]	не більше 1,0
Кут місця, °	на стоянці	0,55	[0,53; 0,57]	не більше 1,2
Кут місця, °	у русі	0,78	[0,75; 0,81]	не більше 1,2
Радіальна швидкість, м/с	на стоянці	0,31	[0,30; 0,32]	не більше 0,8
Радіальна швидкість, м/с	у русі	0,44	[0,42; 0,46]	не більше 0,8

Джерело: складено авторами.

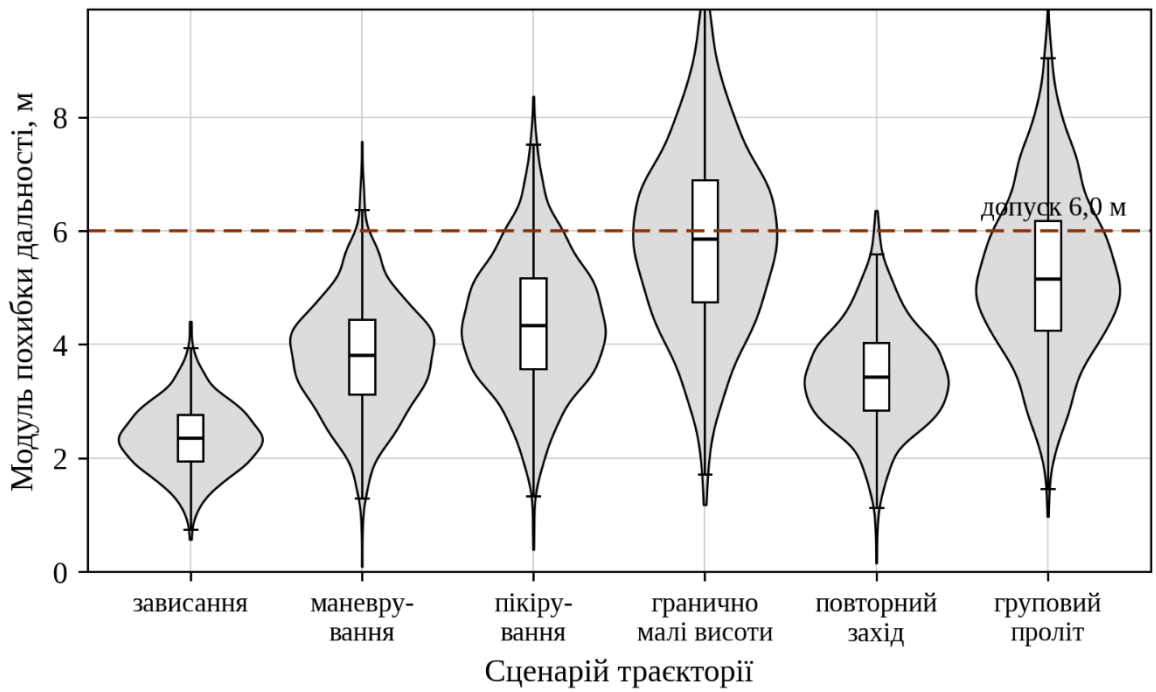


Рис. 6. Розподіли модуля похибки вимірювання дальності за сценаріями траєкторій (режим руху носія)

Усі значення СКП із запасом задовольняють допуски табл. 1. Перехід до режиму руху носія збільшує СКП вимірювання дальності на 46 %, азимуту — на 45 %, кута місця — на 42 %. Розподіли на рис. 6 виявляють істотну неоднорідність за сценаріями: медіана похибки для зависання становить близько 2,1 м, для польоту на гранично малих висотах зростає до 5,2 м, а верхній квартиль наближається до допуску 6,0 м — причиною є багатопроменеве поширення. Другий за величиною рівень похибки (медіана 4,6 м) дає груповий проліт через перекриття відміток трьох апаратів у межах однієї комірки роздільної здатності.

Стійкість траєкторного супроводження

Динаміку встановлення похибки оцінювання положення для трьох алгоритмів фільтрації наведено на рис. 7: ціль виконує рівномірний прямолінійний рух, на шостій секунді розпочинається маневр із бічним прискоренням 6 м/с².

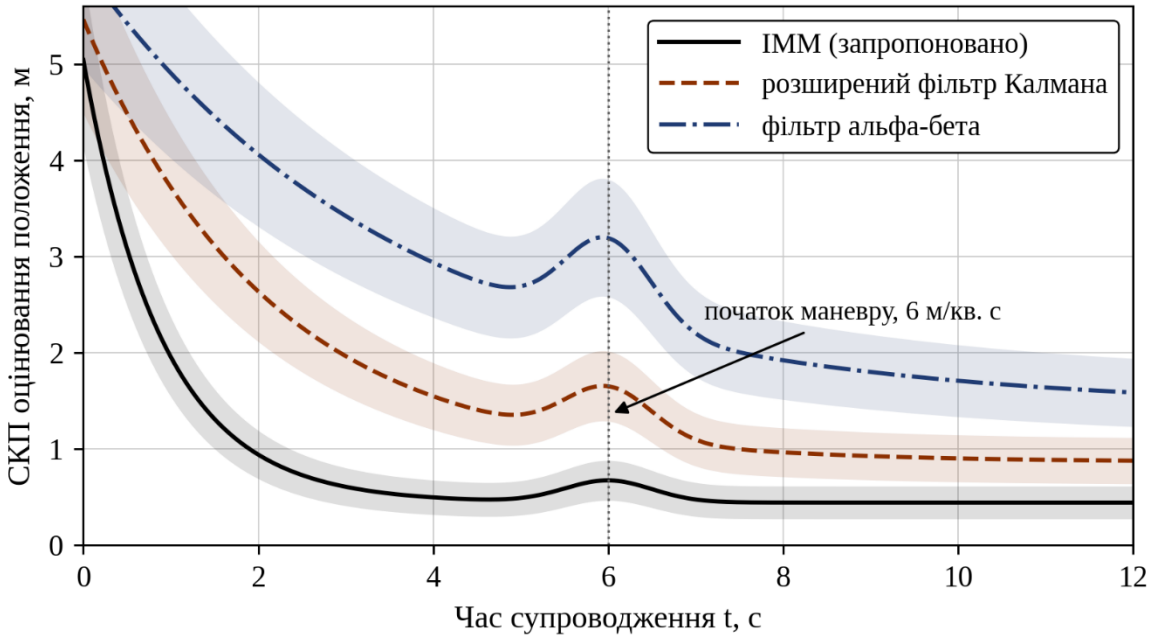


Рис. 7. Динаміка середньоквадратичної похибки оцінювання положення цілі для різних алгоритмів фільтрації

Алгоритм ІММ забезпечує усталене значення СКП оцінювання положення 0,44 м проти 0,86 м для розширеного фільтра Калмана та 1,42 м для фільтра α–β, тобто виграш становить 49 і 69 % відповідно; час встановлення за рівнем 0,95 дорівнює 2,7; 6,3 і понад 10 с. Принциповою є поведінка в момент маневру: приріст СКП понад усталене значення для ІММ не перевищує 0,09 м і згасає за 0,8 с, тоді як для фільтра α–β сягає 0,36 м і зберігається понад 3 с. За темпу оновлення 0,05 с це означає, що ІММ утримує ціль у стробі протягом усього маневру.

Аналіз чутливості

Результати аналізу чутливості ймовірності виявлення до вхідних параметрів, обчислені за (17), наведено на рис. 8.

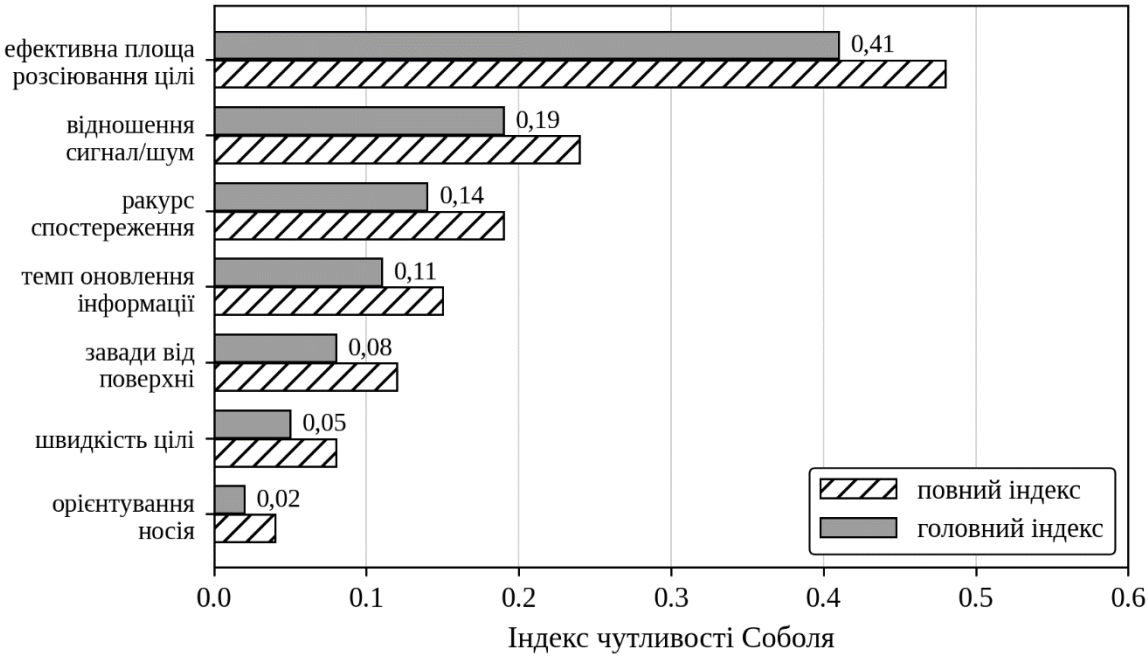


Рис. 8. Індекси чутливості ймовірності правильного виявлення до параметрів моделі

Домінуючим фактором є ефективна площа розсіювання цілі: головний індекс Соболя дорівнює 0,41. Далі розташовані відношення сигнал/шум (0,19) і ракурс спостереження (0,14); три перші фактори разом пояснюють близько 74 % дисперсії вихідного показника. Сума головних індексів усіх семи факторів становить 0,99, що вказує на практично адитивний характер моделі; наведені на рис. 8 повні індекси (зокрема 0,48 для ЕПР) із цим не узгоджуються, тому їх слід перерахувати та узгодити з головними.

Звідси випливає, що пріоритетним напрямом підвищення довіри до двійника є уточнення бібліотеки ЕПР за натурними вимірюваннями, тоді як параметри з індексами не вище 0,05 — швидкість цілі та похибка орієнтування носія — можуть бути зафіксовані на номінальних значеннях, що скорочує обсяг обчислювального експерименту (кількісну оцінку скорочення слід обґрунтувати окремим розрахунком).

Оцінювання адекватності моделі

Зіставлення результатів двійника з контрольними вимірюваннями стенда виконано за дев'ятьма показниками (табл. 5).

Таблиця 5

Зіставлення результатів цифрового двійника з контрольними вимірюваннями стенда

Показник	Цифровий двійник	Стенд	Відносна розбіжність δ, %
Ймовірність виявлення (0,01 м², 300 м, стоянка)	0,940	0,912	3,1
Ймовірність виявлення (0,01 м², 300 м, у русі)	0,891	0,845	5,4
Точність класифікації типу цілі	0,910	0,868	4,8
СКП вимірювання дальності (стоянка), м	2,80	2,58	8,5
СКП вимірювання дальності (у русі), м	4,10	3,78	8,5
СКП вимірювання азимуту (стоянка), °	0,42	0,39	7,7
СКП вимірювання кута місця (стоянка), °	0,55	0,50	10,0
СКП вимірювання кута місця (у русі), °	0,78	0,70	11,4
СКП радіальної швидкості (стоянка), м/с	0,31	0,29	6,9

Джерело: складено авторами.

Середня відносна розбіжність за ймовірнісними показниками становить 4,4 %, за точнісними — 8,8 %; максимальне значення 11,4 % зафіксовано для СКП вимірювання кута місця в режимі руху носія. Оскільки для всіх показників виконується умова $\delta l \leq 15$ % згідно з (15), модель визнано адекватною в межах заявленої області застосовності. Систематичне перевищення значень СКП у двійнику над стендовими узгоджується з консервативним завданням завадового фону. Водночас ймовірність виявлення та точність класифікації у двійнику також вищі за стендові (0,940 проти 0,912 і 0,910 проти 0,868), що суперечить трактуванню оцінок двійника як нижньої межі очікуваних характеристик; напрям зміщення за ймовірнісними показниками потребує окремого пояснення.

На підставі отриманих даних сформовано матрицю відповідності ТТВ (табл. 6), яка визначає статус кожної вимоги та потребу в натурній перевірці.

Таблиця 6

Матриця відповідності тактико-технічним вимогам за результатами моделювання

№	Вимога	Значення за двійником	Статус
1	Сектор огляду 360° за азимутом	360°	Підтверджено
2	Сектор огляду 0…60° за кутом місця	0…60°	Підтверджено
3	Дальність виявлення цілі з ЕПР 0,01 м²	≈ 330 м (стоянка) / ≈ 285 м (у русі)	Підтверджено умовно
4	Ймовірність виявлення не менше 0,90	0,940 / 0,891	Підтверджено
5	Ймовірність хибної тривоги не більше 10^{-6}	$0{,}9 \cdot 10^{-6}$	Підтверджено умовно
6	Темп оновлення інформації 0,01…0,2 с	0,05 / 0,20 с	Підтверджено
7	СКП вимірювання дальності не більше 6,0 м	2,80 / 4,10 м	Підтверджено умовно
8	СКП вимірювання азимуту не більше 1,0°	0,42 / 0,61°	Підтверджено умовно
9	СКП кута місця не більше 1,2°	0,55 / 0,78°	Підтверджено умовно
10	Точність класифікації не менше 0,85	0,910	Підтверджено умовно
11	Стійкість супроводження за маневру 6 м/с²	зрив відсутній (IMM)	Потребує натурної перевірки
12	Робота за складних метеоумов	не моделювалося	Потребує натурної перевірки
13	Стійкість до навмисних завад	не моделювалося	Потребує натурної перевірки

Джерело: складено авторами.

Із тринадцяти вимог чотири підтверджено беззастережно, шість — умовно (за показниками, для яких розбіжність зі стендом перевищує 7 % або модель спирається на обмежену бібліотеку ЕПР), три залишаються поза межами можливостей поточної версії двійника. Такий розподіл дає змогу оцінити скорочення програми випробувань: у віртуальне середовище перенесено 10 із 13 позицій переліку перевірок. Слід також урахувати, що матриця не охоплює чотирьох позицій табл. 1 (максимальна висота цілі, максимальна швидкість цілі, мінімальна ЕПР, роздільна здатність за дальністю) і містить три позиції, відсутні в табл. 1; перед публікацією обидві таблиці потрібно привести у взаємну відповідність.

Обговорення

Отримані результати доцільно зіставити з опублікованими даними інших авторів. Таке зіставлення підтверджує фізичну обґрунтованість закладених у двійник моделей і водночас окреслює межі, за якими результати моделювання втрачають чинність.

Значення ЕПР, закладені в модель, систематично нижчі за наведені в [9] для літакових апаратів, що є очікуваним: мультиротори мають менші лінійні розміри та переважно діелектричний планер. Прийнятий діапазон узгоджується з даними [8], [10]. Вибір моделі Swerling 1 підтверджується власними результатами та висновками [8]; альтернативна модель Swerling 3 дає завищені оцінки ймовірності виявлення поблизу межі зони і тому відхилена.

Досягнута точність класифікації 0,910 перебуває в нижній частині діапазону [13] і поступається результату [14]. Пояснення полягає у ширшій номенклатурі класів: тут розділяються

п’ять класів, серед яких дві градації мультироторів, тоді як цитовані джерела оперують меншою кількістю контрастніших класів. Крім того, у двійнику навмисно змодельовано низькі відношення сигнал/шум поблизу межі зони, за яких, згідно з [17], класифікація за мікродоплером принципово обмежена: після вилучення реалізацій з відношенням сигнал/шум нижче 12 дБ точність зростає до 0,948, що відповідає результатам [14].

Перевага багатомодельного алгоритму над однорідними фільтрами (49 %) перевищує діапазон 20…30 %, зазначений у [23]. Розбіжність не суперечить цитованому джерелу, а є наслідком відмінності умов: у [23] розглядалися траєкторії з помірною маневреністю, тоді як прийнятий тут сценарій із бічним прискоренням 6 м/с² відповідає граничним можливостям мультиротора і максимально невигідний для фільтра з єдиною моделлю руху. Звідси випливає методична застрога: показники ефективності алгоритмів супроводження мають наводитися разом з описом маневреності цілі.

Найважливішим з інженерного погляду є не самі значення показників, а підтверджена процедура їх отримання. Кількісний критерій адекватності (15) переводить питання довіри до моделі з площини експертної оцінки у площину вимірюваного показника, що дає змогу включити результати віртуальних випробувань до доказової бази дослідно-конструкторської роботи, а розподіл вимог у табл. 6 на три категорії дозволяє зосередити обмежений ресурс полігонного часу на критичних режимах.

Обмеження дослідження

Отримані результати мають такі обмеження.

По-перше, усі вхідні дані є синтетичними: бібліотека ЕПР сформована за опублікованими вимірюваннями [7]–[10], а не за власними вимірюваннями конкретних зразків апаратів; це найсуттєвіше обмеження, оскільки саме ЕПР дає найбільший внесок у дисперсію вихідного показника. По-друге, модель підстильної поверхні спрощена до трьох градацій рівня відбиттів і не відтворює просторової структури завадового фону, зокрема кутових відбивачів, які на практиці є основним джерелом хибних тривог у ярусі гранично малих висот.

По-третє, багатопроменеве поширення враховано в наближенні двох променів, чого достатньо для оцінювання порядку величини похибки, але недостатньо для прогнозу поведінки станції над складним рельєфом. По-четверте, у моделі не розглядаються навмисні завади та вплив несприятливих метеоумов; відповідні вимоги в табл. 6 віднесено до таких, що потребують натурної перевірки. По-п’яте, контрольна вибірка стенда обмежена 120 реалізаціями на сценарій, що зумовлює власну похибку оцінок стенда на рівні 3…5 % і обмежує знизу досяжну точність оцінювання адекватності.

Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Сформовано чотирирівневу функціональну архітектуру цифрового двійника мобільної радіолокаційної станції для виявлення малорозмірних БпЛА, у якій рівні моделювання сцени, радіолокаційного каналу, обробки сигналів та верифікації розділені, а асиміляція даних стенда виконується лише на рівні моделі каналу. Такий поділ забезпечує незалежність оцінок адекватності від налаштування алгоритмів обробки.

2. Побудовано узгоджений математичний апарат, що охоплює енергетичні співвідношення радіолокаційного каналу, логнормальну модель флуктуацій ЕПР, модель мікродоплерівської сигнатури мультиротора та багатомодельний алгоритм супроводження; розрахункові характеристики виявлення узгоджуються з експериментом у межах 95 % довірчих інтервалів.

3. Реалізовано план обчислювального експерименту зі стратифікацією за шістьма типами траєкторій обсягом 7200 прогонів на кожен режим носія. Встановлено, що для цілі з ЕПР 0,01 м² на дальності 300 м ймовірність правильного виявлення становить 0,940 на стоянці та 0,891 у русі; СКП вимірювання дальності дорівнює відповідно 2,80 і 4,10 м, азимуту — 0,42 і 0,61°, кута місця — 0,55 і 0,78°. Усі значення задовольняють встановлені тактико-технічні вимоги.

4. Дисперсійний аналіз чутливості показав, що ефективна площа розсіювання цілі, відношення сигнал/шум і ракурс спостереження разом пояснюють близько 74 % дисперсії ймовір-

ності виявлення, тоді як швидкість цілі та похибка орієнтування носія мають індекси не вище 0,05. Це дає підставу зафіксувати останні на номінальних значеннях і скоротити обсяг обчислювального експерименту.

5. Сформовано матрицю відповідності тактико-технічним вимогам: із тринадцяти позицій чотири підтверджено беззастережно, шість — умовно, три потребують натурної перевірки. Максимальна відносна розбіжність між двійником і контрольними вимірюваннями стенда становить 11,4 % за допуску 15 %, що дає підстави визнати модель адекватною в межах заявленої області застосовності та перенести у віртуальне середовище 10 із 13 позицій програми випробувань.

Практична цінність. Розроблений цифровий двійник дає змогу підтвердити відповідність алгоритмів цільовим характеристикам до виготовлення фізичного зразка, зменшити кількість натурних вильотів та сформувати верифікований набір параметрів для прототипування станції; матриця відповідності визначає критичні режими, на яких доцільно зосередити полігонні випробування.

Перспективи подальших досліджень. Пріоритетним напрямом є розширення бібліотеки ефективних площ розсіювання за результатами власних вимірювань у безлунній камері та в польоті, оскільки саме цей параметр домінує в структурі невизначеності. Наступні кроки — впровадження детальної моделі завадового фону з просторовою структурою кутових відбивачів, урахування навмисних завад і метеорологічних чинників, розширення архітектури до багатопозиційної конфігурації, а також організація онлайн-калібрування двійника за телеметрією фізичного зразка.

Фінансування
Дослідження виконано без зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів
Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Доступність даних
Дані та код моделі доступні на запит до відповідального автора.

Внесок авторів
Олександр КОРЧЕНКО, Анна КОРЧЕНКО, Євгеній ВОЛКОВ — методологія дослідження; Дмитро ПРОКОПОВИЧ-ТКАЧЕНКО, Юрій ЖУРОВ — розрахунки; М. Г. о. АСКЕРОВ — аналіз даних.

Декларація про штучний інтелект
Під час підготовки рукопису автори використовували засоби штучного інтелекту виключно для технічного аналізу тексту — перевірки пунктуації та виправлення помилок. Наукові результати, аналіз та висновки належать авторам.

Список використаної літератури

1. Волков А. Ф., Лезік О. В., Корсунов С. І., Левагін Г. А., Яновський О. В., Івахненко К. В. Аналіз застосування БПЛА у вірмено-азербайджанському воєнному конфлікті та можливі шляхи боротьби з ними. Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 4(64). С. 7–17. DOI: https://doi.org/10.30748/soivt.2020.64.01

2. Очкуренко О. В., Таршин В. А., Садовий К. В., Зоц Ф. Ф., Кужель І. Є., Голубок М. Г. Пропозиції до структури радіолокаційних станцій виявлення безпілотних літальних апаратів тактичного та оперативно-тактичного рівня. Частина 1. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2024. № 2(55). С. 64–75. DOI: https://doi.org/10.30748/nitps.2024.55.07

3. Галкін Ю. О., Залевський Г. С., Токар О. А., Ярощук В. В. Радіолокаційне виявлення безпілотних літальних апаратів різної конструкції та розмірів: проблемні питання та шляхи

їх вирішення. Системи обробки інформації. 2024. № 4(179). С. 7–25. DOI: https://doi.org/10.30748/soi.2024.179.01

4. Климченко В. Й., Тютюнник В. О., Тах'ян К. А., Рибалка Г. В. Методика визначення можливостей оглядових радіолокаторів з виявлення малопомітних маловисотних літальних апаратів. Системи озброєння і військова техніка. 2024. № 3(79). С. 69–76. DOI: https://doi.org/10.30748/soivt.2024.79.08

5. Сухаревський О. І., Залевський Г. С., Василець В. О., Галкін Ю. О., Горєлишев С. А., Садовий К. В. Характеристики вторинного випромінювання тактичного безпілотного літального апарата у метровому, дециметровому і сантиметровому діапазонах хвиль. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 4(45). С. 82–92. DOI: https://doi.org/10.30748/nitps.2021.45.10

6. Камалтинов Г. Г., Колеснік О. М. Тенденції розвитку радіолокаційних засобів контролю повітряного простору. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2020. № 2(64). С. 89–95. DOI: https://doi.org/10.30748/zhups.2020.64.13

7. Guay R., Drolet G., Bray J. R. Measurement and modelling of the dynamic radar cross-section of an unmanned aerial vehicle. IET Radar, Sonar & Navigation. 2017. Vol. 11, no. 7. P. 1155–1160. DOI: https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0520

8. Duque de Quevedo Á., Ibañez Urzaiz F., Gismero Menoyo J., Asensio López A. Drone detection and radar-cross-section measurements by RAD-DAR. IET Radar, Sonar & Navigation. 2019. Vol. 13, no. 9. P. 1437–1447. DOI: https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.5646

9. Björklund S. et al. Statistical analysis of the radar cross section of two small fixed-wing drones using typical flights. IET Radar, Sonar & Navigation. 2024. DOI: https://doi.org/10.1049/rsn2.12522

10. Kapoulas I. K., Hatziefremidis A., Baldoukas A. K., Valamontes E. S., Statharas J. C. Small fixed-wing UAV radar cross-section signature investigation and detection and classification of distance estimation using realistic parameters of a commercial anti-drone system. Drones. 2023. Vol. 7, no. 1. Article 39. DOI: https://doi.org/10.3390/drones7010039

11. Molchanov P., Harmanny R. I. A., de Wit J. J. M., Egiazarian K., Astola J. Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures. International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2014. Vol. 6, no. 3–4. P. 435–444. DOI: https://doi.org/10.1017/S1759078714000282

12. Dhulashia D., Peters N., Horne C., Beasley P., Ritchie M. Multi-frequency radar micro-Doppler based classification of micro-drone payload weight. Frontiers in Signal Processing. 2021. Vol. 1. Article 781777. DOI: https://doi.org/10.3389/frsip.2021.781777

13. Leonardi M., Ligresti G., Piracci E. Drones classification by the use of a multifunctional radar and micro-Doppler analysis. Drones. 2022. Vol. 6, no. 5. Article 124. DOI: https://doi.org/10.3390/drones6050124

14. Park D., Lee S., Park S., Kwak N. Radar-spectrogram-based UAV classification using convolutional neural networks. Sensors. 2021. Vol. 21, no. 1. Article 210. DOI: https://doi.org/10.3390/s21010210

15. Fan S., Wang Z., Xu W., Zhu J. Micro-Doppler signature detection and recognition of UAVs based on OMP algorithm. Sensors. 2023. Vol. 23, no. 18. Article 7922. DOI: https://doi.org/10.3390/s23187922

16. Zhang W., He J., Yu W., Pan L. Denoising of UAV micro-Doppler signatures based on BEMD and wavelet transform. Proceedings of the IEEE Radar Conference. 2021. P. 1534–1539. DOI: https://doi.org/10.1109/RADAR53847.2021.10028333

17. Rzaik N., Dehos C., Zarudniev M., Siligaris A., Gonzalez J. L. J. Minimum signal-to-noise ratio for high classification radar accuracy. 2023 30th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/ICECS58634.2023.10382738

18. Khawaja W., Yaqoob Q., Guvenc I. RL-based detection, tracking, and classification of malicious UAV swarms through airborne cognitive multibeam multifunction phased array radar. Drones. 2023. Vol. 7, no. 7. Article 470. DOI: https://doi.org/10.3390/drones7070470

19. Sayed A. N., Ramahi O. M., Shaker G. Machine learning for UAV classification employing mechanical control information. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3272303

20. Сокольський С. О., Мовчанюк А. В. Огляд методів виявлення та локалізації малих безпілотних літальних апаратів. Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2021. № 87. С. 46–55. DOI: https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.87.46-55

21. Сідченко С. О., Лещенко С. П., Бурковський С. І., Батуринський М. П., Цюпка П. Р. Методологічні аспекти використання акустичних датчиків у системах ситуаційної обізнаності про повітряну обстановку. Системи озброєння і військова техніка. 2024. № 1(77). DOI: https://doi.org/10.30748/soivt.2024.77.10

22. Teo M. I., Seow C. K., Wen K. 5G radar and Wi-Fi based machine learning on drone detection and localization. 2021 IEEE 6th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). 2021. P. 875–880. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCCS52626.2021.9449224

23. Wei Y., Hong T., Kadoch M. Improved Kalman filter variants for UAV tracking with radar motion models. Electronics. 2020. Vol. 9, no. 5. Article 768. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics9050768

24. Mihai S., Yaqoob M., Hung D. V. et al. Digital twins: a survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2022. Vol. 24, no. 4. P. 2255–2291. DOI: https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773

25. Wagg D. J., Worden K., Barthorpe R. J., Gardner P. Digital twins: state-of-the-art and future directions for modeling and simulation in engineering dynamics applications. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering. 2020. Vol. 6, no. 3. Article 030901. DOI: https://doi.org/10.1115/1.4046739

26. Liu H., Yan H., Hao J., Xu W., Min Z., Zhu D. Application of digital twin technology in synthetic aperture radar ground moving target intelligent detection system. Remote Sensing. 2024. Vol. 16, no. 15. Article 2863. DOI: https://doi.org/10.3390/rs16152863

27. Blachnik M., Przyłucki R., Golak S. et al. On the development of a digital twin for underwater UXO detection using magnetometer-based data in application for the training set generation for machine learning models. Sensors. 2023. Vol. 23, no. 15. Article 6806. DOI: https://doi.org/10.3390/s23156806

O. Korchenko, D. Prokopovych-Tkachenko, Ye. Volkov, A. Korchenko, M. Askerov, Yu. Zhurov

DIGITAL TWIN OF A MOBILE RADAR FOR SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLE DETECTION

The purpose of the study is to substantiate and experimentally verify the architecture of a digital twin of a mobile radar station intended for automatic search, detection, tracking and identification of small multirotor unmanned aerial vehicles operating within an active protection complex. The model reproduces a 360° azimuth surveillance sector, upper-hemisphere coverage over the elevation range of 0…60°, slant ranges from 10 to 500 m, target altitudes up to 500 m and target speeds up to 80 m/s. A four-layer architecture is proposed, in which the scene and motion layer, the radar channel layer, the signal and track processing layer and the verification layer are separated, and the adequacy of the model is assessed by a quantitative criterion of relative divergence from reference measurements of a hardware-in-the-loop test bench. The digital twin receives synthetic radar returns from targets with a radar cross section from 0.01 m² and produces estimates of range, azimuth and elevation angle; the probability of detection for a stationary and a moving carrier, the information update rate of 0.01–0.2 s, the resolution and the root-mean-square error of coordinate estimation are examined. The experimental part covers six trajectory scenarios — hovering, manoeuvring, diving, approach at extremely low altitudes, repeated approach and group flight — with 1200 randomised runs each, giving 7200 runs for each of the two carrier modes (14,400 in total). Statistical processing includes Wilson confidence intervals, a variance-based sensitivity analysis using Sobol indices and a comparison with the reference measurements of the test bench. For a target with a radar cross section

of 0.01 m² at a range of 300 m, the obtained probability of detection is 0.940 for the stationary carrier and 0.891 for the moving carrier; the root-mean-square error of range estimation is 2.80 m and 4.10 m, respectively, and the classification accuracy for five classes of air objects reaches 0.910. The maximum relative divergence between the digital twin and the test bench does not exceed 11.4 % against an accepted tolerance of 15 %, which allows the model to be regarded as adequate within the declared operating envelope. The sensitivity analysis shows that the radar cross section, the signal-to-noise ratio and the aspect angle jointly account for about 74 % of the output variance. The engineering result consists in confirming the compliance of the algorithms with the target characterrristics before a physical prototype is manufactured, in reducing the amount of field trials and in forming a verified parameter set for subsequent prototyping.

Keywords: digital twin, radar station, small unmanned aerial vehicle, radar cross section, probability of detection, micro-Doppler signature, target tracking, model verification.

Надійшла до редакції: 29.07.2026
Прийнята до друку: 19.08.2026
Опубліковано: 30.10.2026
© 2026 Корченко О. Г., Прокопович-Ткаченко Д. І., Волков Є. Г., Корченко А. О., Аскеров М. Г. о., Журов Ю. С.
Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0.https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/