

Корченко Олександр Григорович

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, перший проректор
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна
ORCID: 0000-0003-3376-0631;
o.korchenko@duikt.edu.ua

Прокопович-Ткаченко Дмитро Ігорович

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій
Університет митної справи та фінансів, Дніпро, Україна
ORCID: 0000-0002-6590-3898;
prokopovich-tkachenko@umsf.dp.ua

Волков Євгеній Георгійович

кандидат економічних наук, докторант
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна
ORCID: 0009-0005-2023-9611
machinecw@gmail.com

Корченко Анна Олександрівна

доктор технічних наук, професор, професор кафедри безпеки інформації та телекомунікацій
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
професор кафедри безпеки інформаційних технологій
Національний авіаційний університет
ORCID: 0000-0003-0016-1966;
annakor@ukr.net

Аскеров Мукафат Гейбат огли

кандидат технічних наук, професор кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна
ORCID: 0009-0000-6611-2732;
mukafat_ask@ukr.net

Журов Юрій Станіславович,

ІТ-спеціаліст
SMB Cybersecurity Advisors, США
ORCID: 0000-0002-8276-2230;
iurii.zhurov@smbsecurityadvisors.com

ЛАБОРАТОРНА ВЕРИФІКАЦІЯ БАГАТОКАНАЛЬНОГО СУПРОВОДЖЕННЯ ГРУПОВИХ ПРОЛЬОТІВ МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗАСОБАМИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ

Анотація. Робота присвячена експериментальній перевірці здатності радіолокаційної станції моніторингу повітряного простору одночасно виявляти та супроводжувати цільні групи малорозмірних БпЛА. У цифровому двійнику реалізовано сценарії послідовного входження, одночасної та квазіодночасної появи кількох цілей у зоні виявлення, а також комбінованого групового прольоту з різних напрямків. Модель підтримує до 20 одночасно супроводжуваних цілей, інтервали між окремими апаратами до 5 с і між підгрупами до 10 с. Лабораторний стенд генерує траєкторії з різними швидкостями, висотами, курсами та характером маневру, після чого оцінюються стійкість трас, ймовірність втрати супроводження, частота хибного об'єднання відміток і затримка передавання даних зовнішнім інформаційним споживачам. Окремо досліджується робота селекції на тлі взаємного екранування та цільного розташування цілей. Результати експериментів демонструють граничне навантаження обчислювального тракту, визначають необхідну продуктивність процесора та вимоги до алгоритмів розподілу вимірювань між трасами. Показано, що схема спільної ймовірнісної асоціації даних (JPDA) у комбінованому сценарії зменшує ймовірність зриву супроводження з 0,117 до 0,064 і майже ввіччі знижує частоту хибного об'єднання відміток ціною зростання часу оброблення огляду на 34 %; у розрахунковій точці (20 цілей, темп оновлення 2 Гц) завантаження процесора становить 94,8 %, а максимальна розбіжність моделі зі стендом не перевищує 9,6 % за критеріального рівня 15 %, що підтверджує адекватність цифрового двійника. Інженерний результат полягає у підтвердженні багатоканальності системи, виборі параметрів трекера та формуванні обґрунтованих вимог до апаратури оброблення даних за цільної групової повітряної обстановки. Для кожної конфігурації виконується серія повторних прогонів із випадковим варіюванням початкових координат і моментів входження в сектор огляду. Результати подаються у вигляді карт завантаження, графіків стійкості трас і матриці помилок асоціації. Це забезпечує кількісне обґрунтування меж масштабування системи та дозволяє ще на лабораторній стадії визначити резерв продуктивності для складніших сценаріїв повітряної обстановки.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; цифровий двійник; радіолокаційна станція; багатоканальне супроводження; групова повітряна обстановка; асоціація вимірювань; стійкість траси; моніторинг повітряного простору.

© 2026 Корченко О.Г., Прокопович-Ткаченко Д.І., Волков Є.Г., Корченко А. О., АскеровМ.Г., Журов Ю.С. Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Oleksandr Korchenko

Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice Rector
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine
 ORCID: 0000-0003-3376-0631;
o.korchenko@duikt.edu.ua

Dmytro Prokopovych-Tkachenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of the Department of Cybersecurity and Information Technology
University of Customs and Finance, Dnipro, Ukraine
 ORCID: 0000-0002-6590-3898;
prokopovich-tkachenko@umsf.dp.ua

Yevhenii Volkov

Candidate of Economic Sciences, doctoral student
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine
 ORCID: 0009-0005-2023-9611
machinecw@gmail.com

Anna Korchenko

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor in the Department of Information Security and Telecommunications
Dnipro Polytechnic National Technical University,
 Professor in the Department of Information Technology Security
National Aviation University
 ORCID: 0000-0003-0016-1966;
annakor@ukr.net

Mukafat Askerov

Candidate of Technical Sciences, Professor in the Department of Mobile and Video Information Technologies
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine
 ORCID: 0009-0000-6611-2732;
mukafat_ask@ukr.net

Yurii Zhurov

IT Specialist
SMB Cybersecurity Advisors, USA
 ORCID: 0000-0002-8276-2230;
iurii.zhurov@smbsecurityadvisors.com

LABORATORY VERIFICATION OF MULTICHANNEL TRACKING OF DENSE GROUPS OF SMALL UAVS USING A DIGITAL TWIN OF A RADAR STATION

Abstract. The paper presents an experimental laboratory verification of the ability of a mobile airspace monitoring radar to simultaneously detect and track dense groups of small multirotor unmanned aerial vehicles (UAVs). The study is performed using a previously developed digital twin of the radar, extended with a multichannel track processing layer. Four typical group-traffic scenarios are implemented in the twin: sequential entry of single targets, simultaneous and quasi-simultaneous appearance of several targets in the detection zone, and a combined group transit from three directions with up to 20 simultaneously tracked targets, inter-vehicle intervals of up to 5 s and inter-subgroup intervals of up to 10 s. The laboratory bench generates target trajectories with randomized speeds (8–42 m/s), altitudes (30–500 m), headings and manoeuvre patterns, after which track continuity, probability of track loss, the rate of false plot merging, and the latency of data delivery to external information consumers are estimated over fifty Monte Carlo runs per configuration. Track initiation uses an M-of-N confirmation rule, state estimation is based on an interacting multiple model filter, and two measurement-to-track association schemes are compared: global nearest neighbour assignment and joint probabilistic data association. Special attention is paid to plot-track association in dense formations, where mutual shadowing and unresolved plots provoke track swap and coalescence. The experiments show that the joint probabilistic scheme reduces the probability of track loss in the combined scenario from 0.117 to 0.064 and almost halves the false merging rate, at the cost of a 34 % increase of the processing time per scan. The computational load model verified against the bench indicates 94.8 % processor utilization at the design point of 20 targets and a 2 Hz update rate, which defines the required processing margin. The maximum divergence between the model and the bench does not exceed 9.6 % against the 15 % tolerance criterion, which confirms the adequacy of the digital twin. The engineering outcome is the confirmed multichannel capability of the system, justified tracker parameters and quantitative requirements for the processing hardware intended for airspace monitoring and the protection of critical infrastructure under dense group UAV traffic.

Keywords: unmanned aerial vehicle; digital twin; radar station; multichannel tracking; dense air traffic; measurement association; track continuity; airspace monitoring.

1. Вступ

2. Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями

Стрімке зростання інтенсивності польотів малорозмірних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) мультироторного типу перетворило контроль малих висот на одну з ключових задач систем моніторингу повітряного простору та захисту об'єктів критичної інфраструктури. Практика радіолокаційного спостереження свідчить, що дедалі типовішими стають не поодинокі, а групові польоти, за яких кілька апаратів входять у зону

виявлення практично одночасно або з малими інтервалами, з різних напрямків і на різних висотах. За таких умов вузьким місцем радіолокаційної станції (РЛС) виявлення стає не стільки енергетика каналу виявлення, скільки підсистема вторинного оброблення: спроможність зав'язати, підтвердити та стійко супроводжувати десятки трас одночасно, коректно розподіляючи вимірювання між ними та передаючи дані про повітряну обстановку зовнішнім інформаційним споживачам із гарантованою затримкою.

Специфіка групового польоту полягає не лише у кількості цілей, а й у його часовій та просторовій структурі. Одночасна поява групи створює пікове навантаження на етап зав'язування трас, коли трекер має за лічені огляди перейти від порожнього стану до повного комплексу підтверджених трас. Квазіодночасне входження підгруп із рознесенням у часі перевіряє здатність системи приймати нові цілі, не деградуючи за якістю супроводження вже наявних. Нарешті, комбінований сценарій із кількома напрямками входження поєднує обидва режими з ефектами щільного розташування цілей у стробах, взаємного екранування та нерозділених відміток, за яких класичні однозначні схеми асоціації систематично помиляються. Саме тому верифікація багатоканального режиму має виконуватися на повній сітці сценаріїв, а не лише за максимальною кількістю цілей.

Натурні випробування багатоканального супроводження групових сценаріїв пов'язані з високою вартістю, регуляторними обмеженнями використання повітряного простору та практичною складністю відтворення граничних конфігурацій з двадцяти і більше апаратів у контрольованих і повторюваних умовах. Це зумовлює доцільність лабораторної верифікації засобами цифрового двійника РЛС, який відтворює тракт від радіолокаційного каналу до вихідного інформаційного інтерфейсу і дозволяє статистично оцінити поведінку трекера у відтворюваних сценаріях. Робота продовжує цикл досліджень авторів, у якому раніше було побудовано та верифіковано цифровий двійник мобільної РЛС виявлення малорозмірних БпЛА; предметом цієї статті є багатоканальний режим супроводження за групових польотів.

3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика радіолокаційного виявлення малорозмірних БпЛА системно висвітлена у вітчизняних працях. О. В. Очуренко зі співавторами обґрунтували структуру РЛС виявлення БпЛА тактичного та оперативно-тактичного рівня [1; 2], В. Й. Климченко зі співавторами проаналізували напрямки модернізації оглядових РЛС радіотехнічних військ для підвищення ефективності виявлення малорозмірних цілей [3] та узагальнили практичний досвід спостереження інтенсивного застосування БпЛА [4]. Ю. О. Галкін зі співавторами розглянули проблемні питання радіолокації БпЛА різної конструкції та запропонували комплексний підхід на основі математичного моделювання відбитих сигналів і мультирадарних систем [5]. Можливості виявлення БпЛА за випромінюванням їхніх радіоліній досліджено у [6], огляд методів виявлення та локалізації малих БпЛА наведено у [7], тенденції розвитку радіолокаційних засобів контролю повітряного простору – у [8], а питання вибору параметрів зондувального сигналу – у [9].

Теоретичне підґрунтя багатоканального супроводження становлять класичні праці з асоціації вимірювань: алгоритм багатогіпотезного супроводження Д. Ріда [10], спільна ймовірнісна асоціація даних (JPDA) [11; 12], огляд багатогіпотезних методів С. Блекмана [13], фільтр взаємодіючих моделей (IMM) [14], узагальнення ймовірнісної асоціації [15] та безрозмірна функція оцінювання траси [16]. Задача призначення вимірювань трасам у глобальному найближчому сусіді (GNN) зводиться до угорського алгоритму [17], а коректне порівняння багатоцільових оцінювачів забезпечує метрика GOSPA [18]. Прикладні аспекти спостереження групових польотів БпЛА розкрито в огляді засобів виявлення, класифікації та супроводження БпЛА радіолокаційними й телекомунікаційними системами [19], дослідженні когнітивної багатопроменевої РЛС для супроводження щільних роїв [20] та аналізі систем контролю ройових польотів в умовах міської забудови [21]. Мікродоплерівські ознаки, критичні для селекції мультироторних цілей, досліджено у [22–25]. Застосування технології цифрових двійників до радіолокаційних систем і формування навчальних вибірок висвітлено у [26; 27].

Виділення невирішених частин загальної проблеми. У наведених працях багатоканальне супроводження розглядається або на рівні алгоритмів у абстрактних модельних умовах, або на рівні тактичних вимог без кількісного зв'язку з обчислювальними ресурсами конкретної РЛС. Залишаються недостатньо дослідженими: поведінка трекера малопотужної мобільної РЛС за одночасної появи 10–20 малорозмірних цілей; кількісне співвідношення між схемою асоціації вимірювань, стійкістю трас та навантаженням процесора; статистика хибного об'єднання відміток за щільного розташування цілей і взаємного екранування; виконання вимог до затримки видавання даних зовнішнім споживачам у граничних сценаріях. Бракує також методичного апарату лабораторної верифікації цих характеристик до етапу натурних випробувань.

4. Мета і задачі дослідження

Мета статті – лабораторна верифікація багатоканального режиму супроводження групових польотів малорозмірних БпЛА засобами цифрового двійника мобільної РЛС із кількісним обґрунтуванням параметрів трекера та вимог до обчислювального тракту. Завдання дослідження: 1) розширити цифровий двійник РЛС шаром багатоканального вторинного оброблення та генератором групових сценаріїв; 2) сформувати систему показників стійкості супроводження, помилок асоціації та часових характеристик; 3) виконати статистичні експерименти за чотирма типовими сценаріями з порівнянням схем асоціації GNN та JPDA; 4) верифікувати модель навантаження обчислювача за даними стенда та сформувати вимоги до апаратури оброблення. Наукова новизна полягає в тому, що вперше для мобільної РЛС виявлення малорозмірних БпЛА отримано верифіковані

на лабораторному стенді кількісні залежності стійкості багатоканального супроводження та завантаження обчислювального тракту від складу і структури групового прольоту та схеми асоціації вимірювань.

5. Матеріали і методи

Дослідження виконано на лабораторному стенді, який поєднує цифровий двійник РЛС (шари сцени, радіолокаційного каналу та первинного оброблення, верифіковані в попередній роботі авторів) із новим шаром багатоканального вторинного оброблення. Генератор сценаріїв формує груповий проліт як сукупність підгруп, у межах яких моменти входження цілей у сектор огляду задаються потоком

$$t(k) = t(0) + \sum \delta(i), \quad \delta(i) \in [\delta_{min}; \delta_{max}], \quad i = 1, \dots, k, \quad (1)$$

де $\delta(i)$ – випадковий інтервал між входженням сусідніх цілей; для одиночних апаратів $\delta_{max} = 5$ с, для підгруп інтервал між першими цілями сусідніх підгруп не перевищує 10 с. Рух кожної цілі описується вектором стану $x = (x, v_x, y, v_y, z, v_z)^T$ у моделі рівномірного прямолінійного руху

$$x(k+1) = F \cdot x(k) + w(k), \quad w(k) \sim N(0, Q), \quad (2)$$

та в моделі координованого розвороту з кутовою швидкістю ω

$$x(k+1) = F(\omega) \cdot x(k) + w(k), \quad |\omega| \leq \omega_{max}, \quad (3)$$

де $F, F(\omega)$ – перехідні матриці; Q – коваріаційна матриця збурень. Оцінювання стану виконує фільтр взаємодіючих моделей IMM [14] з двома зазначеними моделями; ваги моделей оновлюються за правилом

$$\mu(j)(k) = \Lambda(j)(k) \cdot \sum p(ij) \cdot \mu(i)(k-1) / c, \quad (4)$$

де $\Lambda(j)(k)$ – правдоподібність j -ї моделі; $p(ij)$ – імовірності переходів; c – нормувальний множник. Відбір вимірювань-кандидатів для траси здійснюється стробуванням за відстанню Махаланобіса

$$d^2 = v^T \cdot S^{-1} \cdot v \leq \gamma, \quad (5)$$

де v – нев'язка вимірювання; S – її коваріація; поріг γ відповідає квантилю розподілу χ^2 -квадрат із трьома ступенями вільності на рівні 0,99 ($\gamma = 11,34$). Порівнювалися дві схеми асоціації. Схема GNN розв'язує задачу призначення

$$\min \sum \sum c(ij) \cdot z(ij), \quad \sum z(ij) \leq 1, \quad z(ij) \in \{0; 1\}, \quad (6)$$

де $c(ij) = d^2(ij) + \ln|S(ij)|$ – вартість призначення i -го вимірювання j -й трасі; задача розв'язується угорським алгоритмом [17]. Схема JPDA обчислює ймовірності асоціації як суму ймовірностей сумісних гіпотез θ [11; 12]:

$$\beta(ij) = \sum P(\theta | Z(k)), \quad \theta: \text{вимірювання } i \rightarrow \text{траса } j, \quad (7)$$

i оновлює кожну трасу зваженою сумою нев'язок. Зав'язування та підтвердження трас виконується за логікою М-із-N: траса підтверджується, якщо з $N = 4$ послідовних оглядів щонайменше $M = 3$ містять асоційовані вимірювання; скидання відбувається після трьох послідовних пропусків. Роздільність двох цілей у групі визначається умовами

$$\Delta R > c \cdot \tau / 2, \quad \Delta \beta > \theta_{0,5}, \quad (8)$$

де $\Delta R, \Delta \beta$ – рознесення цілей за дальністю та азимут; τ – тривалість стисненого імпульсу; $\theta_{0,5}$ – ширина променя за рівнем половинної потужності. Якщо умови (8) порушено, дві цілі формують нерозділену відмітку, що провокує хибне об'єднання трас.

Система показників. Стійкість супроводження оцінюється коефіцієнтом

$$Kst = \sum Ttrack(j) / \sum Tvis(j), \quad (9)$$

де $Ttrack(j)$ – сумарний час перебування j -ї цілі на підтвердженій трасі; $Tvis(j)$ – час перебування цілі в зоні виявлення. Імовірність зриву супроводження оцінюється часткою

$$Ploss = nloss / ntar, \quad (10)$$

з довірчим інтервалом Вілсона на рівні 0,95. Частота хибного об'єднання відміток нормується на кількість зближень цілей

$$\lambda_{mrg} = 100 \cdot N_{mrg} / N_{conv}, \quad (11)$$

де N_{mrg} – кількість епізодів об'єднання трас; N_{conv} – кількість зближень пар цілей до відстані, меншої за два елементи розділення. Точність багатоцільового оцінювання контролюється метрикою GOSPA [18]

$$GOSPA = (\sum d(xi, up(i))^p + (c^p/2) \cdot (|nmiss| + |nfalse|))^{1/p}, \quad (12)$$

з параметрами $p = 2, c = 10$ м. Затримка доставлення даних визначається як $L = tout - tdet$ – інтервал від моменту виявлення відмітки до надходження оновлення траси на вихідний інформаційний інтерфейс; вимога сформульована у ймовірнісній формі

$$P(L \leq 150 \text{ мс}) \geq 0,95. \quad (13)$$

Завантаження обчислювального тракту апроксимується моделлю

$$\rho(N, F) = c0 + c1 \cdot N \cdot F + c2 \cdot N^2 \cdot F, \quad (14)$$

де N – кількість супроводжуваних цілей; F – темп оновлення даних; доданок $c_1 \cdot N \cdot F$ описує лінійні витрати на фільтрацію трас, доданок $c_2 \cdot N^2 \cdot F$ – комбінаторні витрати на стробування та асоціацію; коефіцієнти $c_0 = 0,028$, $c_1 = 0,006$ с, $c_2 = 0,00085$ с ідентифіковано за вимірюваннями часу циклу на стенді методом найменших квадратів. Адекватність двійника контролюється критерієм відносної розбіжності

$$\varepsilon = |Y_{mod} - Y_{bench}| / Y_{bench} \leq 0,15, \quad (15)$$

де Y_{mod} , Y_{bench} – значення показника за моделлю та за стендом відповідно.

Архітектурно шар вторинного оброблення стенда складається з чотирьох послідовних модулів: стробування відміток, асоціації вимірювань із трасами, фільтрації стану та управління трасами (зав'язування, підтвердження, скидання). Модулі мають уніфіковані інтерфейси, що дозволяє замінювати схему асоціації без зміни решти тракту та вимірювати час виконання кожного модуля окремо системним таймером з роздільністю 1 мкс. Вихідний інтерфейс стенда відтворює протокол обміну із зовнішніми інформаційними споживачами, включно з часовими мітками формування відмітки та видавання оновлення траси, з яких обчислюється затримка доставлення даних. Кожний прогін Монте-Карло охоплює повний життєвий цикл сценарію від входження першої цілі до виходу останньої з зони виявлення; статистики накопичуються за всіма цілями та всіма прогонами конфігурації.

Умови відтворюваності. Обчислювальне ядро стенда реалізовано мовою Python 3.11 (NumPy 1.26, SciPy 1.11) з фіксованим зерном генератора псевдовипадкових чисел; темп оновлення даних 2 Гц; сектор огляду 90° ; інструментальна дальність 3 км; імовірність виявлення одиночної цілі в зоні впевненого виявлення 0,90–0,94; щільність хибних відміток $2 \cdot 10^{-5}$ на елемент розділення. Для кожної конфігурації «сценарій $\times$ схема асоціації» виконано 50 незалежних прогонів із випадковим варіюванням початкових координат, курсів і моментів входження цілей.

6. Результати

Сценарії експериментів. Параметри чотирьох типових групових сценаріїв наведено в табл. 1. Сценарій S1 відтворює послідовне входження одиночних апаратів, S2 – одночасну появу групи, S3 – квазіодночасне входження підгруп із рознесенням у часі, S4 – комбінований проліт з трьох напрямків із максимальним складом 20 цілей, що відповідає проєктному ліміту каналів супроводження.

Таблиця 1

Сценарії групових прольотів БпЛА

Сценарій	Характер входження цілей	Кількість цілей, од.	Інтервали входження, с	Напрямки підльоту
S1	Послідовне входження одиночних апаратів	10	5,0	один
S2	Одночасне входження групи	10	$\leq 0,5$	один
S3	Квазіодночасне входження трьох підгруп	10 (4+3+3)	$\leq 0,5$ у підгрупі; 10,0 між підгрупами	два
S4	Комбінований проліт трьома підгрупами	20 (8+6+6)	$\leq 0,5$ у підгрупі; 10,0 між підгрупами	три

Просторову конфігурацію комбінованого сценарію S4 у зменшеному складі ілюструє рис. 1: фронтальна підгрупа рухається прямолінійно, флангові виконують маневр курсом, низьковисотна підгрупа входить із протилежного флангу. Діапазони варіювання параметрів траєкторій наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Діапазони варіювання параметрів траєкторій цілей

Параметр	Мінімум	Максимум	Розподіл
Швидкість польоту, м/с	8	42	рівномірний
Висота польоту, м	30	500	рівномірний
Курсовий параметр, м	–1200	1200	рівномірний
Поперечне прискорення маневру, м/с ²	0	19,6	дискретний {0; 9,8; 19,6}
ЕПР цілі, м ²	0,01	0,05	логнормальний
Частка маневруючих цілей, %	30	50	за сценарієм

Параметри багатоканального трекера, обрані за результатами попереднього налаштування, зведено в табл. 3; вони є спільними для обох схем асоціації, що забезпечує коректність порівняння.

Таблиця 3

Параметри багатоканального трекера

Параметр	Позначення	Значення
Кількість каналів супроводження, од.	N	20
Темп оновлення даних, Гц	F	2
Поріг стробування (хі-квадрат, 3 ступені вільності)	γ	11,34
Логіка підтвердження траси	M/N	3/4
Кількість пропусків до скидання траси, од.	Ndrop	3
Моделі IMM	—	CV; CT
Імовірність збереження моделі IMM	p11 = p22	0,95
Максимальна кутова швидкість розвороту, °/с	$\omega_{\max}$	25

Динаміка навантаження трекера. Кількість активних трас у часі для сценаріїв S1, S2 і S4 показано на рис. 2. У сценарії S2 десять трас підтверджуються протягом 2,0–2,5 с після появи групи, що відповідає логіці 3/4 за темпу 2 Гц. У сценарії S4 навантаження досягає проектного ліміту 20 трас на 25-й секунді і утримується до виходу перших цілей із зони; короткочасні провали графіка відповідають епізодам скидання трас із подальшим повторним зав'язуванням.

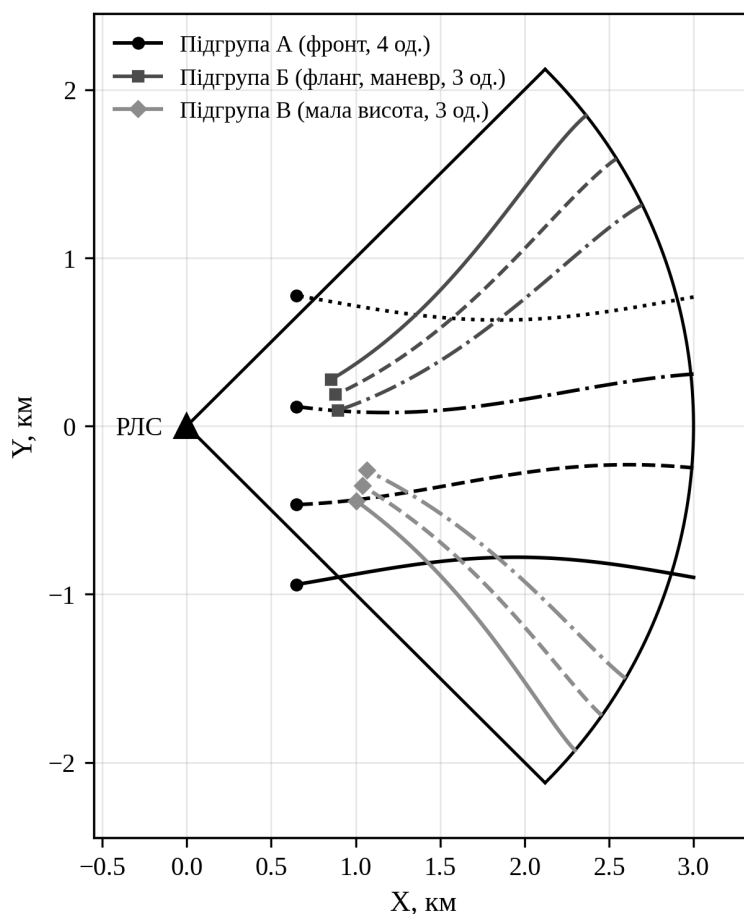


Рис. 1. План траєкторій комбінованого групового прольоту в секторі огляду РЛС (фрагмент, 10 цілей)

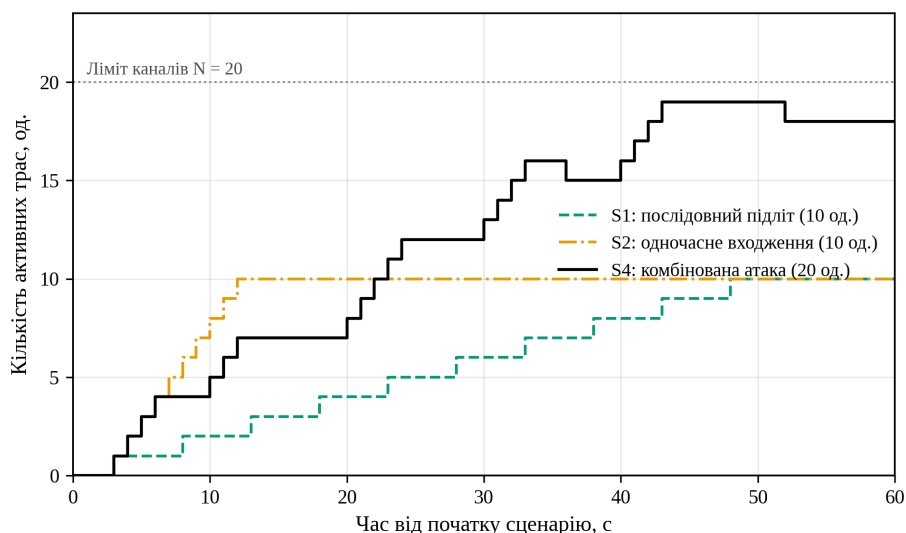
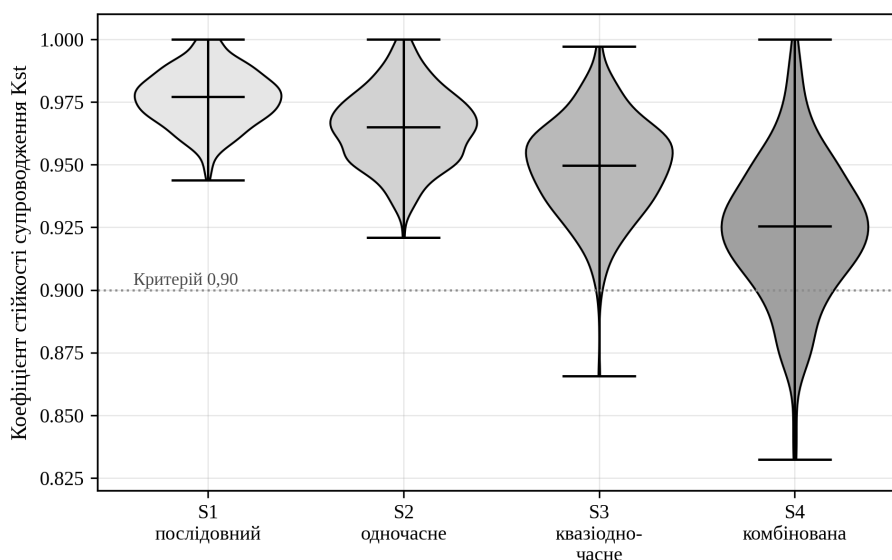


Рис. 2 Кількість активних трас у часі за сценаріями S1, S2, S4 (типові прогони)

Стійкість супроводження. Розподіли коефіцієнта стійкості K_{st} за 50 прогонами для схеми JPDA подано на рис. 3 у формі діаграм щільності; медіанні значення та решту показників зведено в табл. 4. Медіана K_{st} знижується від 0,978 у сценарії S1 до 0,921 у сценарії S4, проте навіть у найскладнішому сценарії розподіл лишається вищим за критеріальний рівень 0,90 у 84 % прогонів.

Рис. 3. Розподіли коефіцієнта стійкості супроводження K_{st} за сценаріями (схема JPDA, 50 прогонів)

Таблиця 4

Показники багатоканального супроводження за сценаріями (схема JPDA)

Сценарій	K_{st} (медіана)	P_{loss} (інтервал Вілсона 0,95)	λ_{mrg} , на 100 зближень	Затримка L: медіана / 95-й процентиль, мс
S1	0,978	0,014 (0,006–0,031)	0,8	72 / 118
S2	0,964	0,026 (0,014–0,047)	2,4	96 / 146
S3	0,949	0,037 (0,022–0,061)	3,1	107 / 163
S4	0,921	0,064 (0,050–0,081)	5,7	129 / 205

Помилки асоціації. Структуру помилок асоціації вимірювань за 50 прогонами кожного сценарію (схема JPDA) розкриває табл. 5. Домінантним типом у щільних групах є тимчасове об'єднання трас унаслідок нерозділених відміток за порушення умов (8); перестановки трас (обмін номерами між трасами сусідніх цілей) зростають від поодиноких у S1 до 41 епізоду в S4, що узгоджується з відомою схильністю зважених схем асоціації до злиття оцінок близьких цілей.

Матриця помилок асоціації за сценаріями, епізодів на 50 прогонів (схема JPDA)

Тип помилки	S1	S2	S3	S4
Перестановка трас (swap)	2	11	17	41
Об'єднання трас (coalescence)	1	9	14	33
Розщеплення траси (split)	3	7	9	19
Передчасне скидання траси	5	10	13	27
Хибна траса, підтверджена понад 2 с	4	6	8	15

Звертає на себе увагу асиметрія між типами помилок: передчасні скидання трас переважно виникають на низьковисотній підгрупі, де ймовірність виявлення знижена через вплив кута місця та підстильної поверхні, тоді як перестановки й об'єднання концентруються у фронтальній підгрупі з мінімальними взаємними рознесеннями. Хибні траси, підтверджені понад 2 с, залишаються нечисленними в усіх сценаріях, що свідчить про достатність логіки 3/4 для фільтрації хибних відміток за прийнятої їх щільності.

Порівняння схем асоціації. Імовірності зриву супроводження для восьми конфігурацій «сценарій × схема» подано на рис. 4. Схема JPDA у всіх сценаріях зменшує Ploss у 1,5–1,8 раза порівняно з GNN; у граничному сценарії S4 лише JPDA утримує показник поблизу критеріального рівня 0,05 (0,064 проти 0,117 у GNN). Кількісне зіставлення схем за сукупністю показників наведено в табл. 6: вииграш JPDA у стійкості досягається ціною зростання часу оброблення одного огляду на 34 % і відповідного підвищення завантаження процесора.

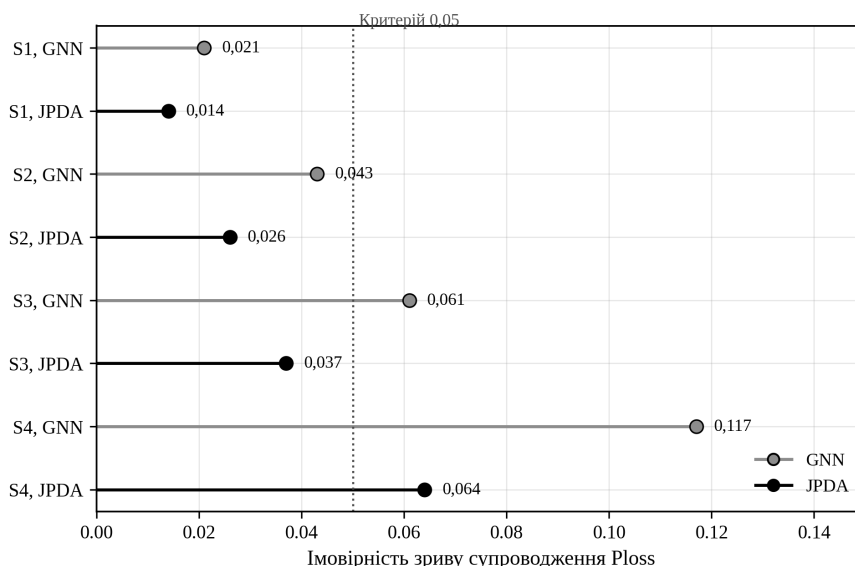


Рис. 4. Імовірність зриву супроводження Ploss для конфігурацій «сценарій × схема асоціації»

Таблиця 6

Порівняння схем асоціації вимірювань у сценарії S4 (20 цілей)

Показник	GNN	JPDA	Відношення JPDA/GNN
Імовірність зриву супроводження Ploss	0,117	0,064	0,55
Частота хибного об'єднання λ_{mrg} , на 100 зближень	10,9	5,7	0,52
Метрика GOSPA (медіана), м	14,6	11,2	0,77
Час оброблення одного огляду, мс	38,2	51,2	1,34
Завантаження процесора за (14), %	70,8	94,8	1,34

Часові характеристики. Емпіричні функції розподілу затримки доставлення даних на вихідний інформаційний інтерфейс показано на рис. 5. Вимога (13) виконується зі значним запасом у сценарії S1 (F(150

мс) = 0,995) та з мінімальним запасом у сценарії S2 (0,957); у сценарії S3 вимога порушується незначно (95-й перцентиль затримки 163 мс перевищує граничні 150 мс), а у сценарії S4 імовірність вкластися у 150 мс становить лише 0,82, а 95-й перцентиль затримки сягає 205 мс. Таким чином, за поточної продуктивності обчислювача вимога до затримки у комбінованому сценарії з 20 цілями не забезпечується.

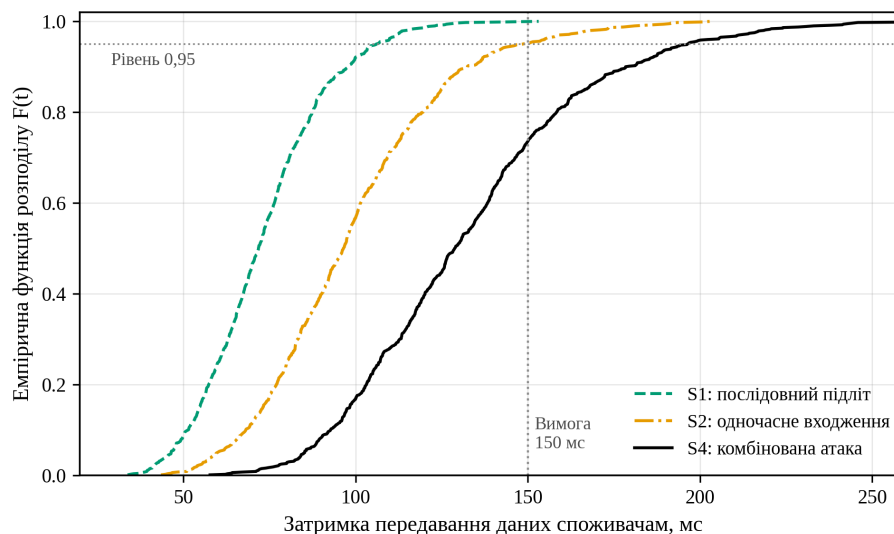


Рис. 5. Емпіричні функції розподілу затримки передавання даних зовнішнім споживачам

Таблиця 2

Діапазони варіювання параметрів траєкторій цілей

Параметр	Мінімум	Максимум	Розподіл
Швидкість польоту, м/с	8	42	рівномірний
Висота польоту, м	30	500	рівномірний
Курсовий параметр, м	-1200	1200	рівномірний
Поперечне прискорення маневру, м/с ²	0	19,6	дискретний {0; 9,8; 19,6}
ЕПР цілі, м ²	0,01	0,05	логнормальний
Частка маневруючих цілей, %	30	50	за сценарієм

Параметри багатоканального трекера, обрані за результатами попереднього налаштування, зведено в табл. 3; вони є спільними для обох схем асоціації, що забезпечує коректність порівняння.

Таблиця 3

Параметри багатоканального трекера

Параметр	Позначення	Значення
Кількість каналів супроводження, од.	N	20
Темп оновлення даних, Гц	F	2
Поріг стробування (хі-квадрат, 3 ступені вільності)	γ	11,34
Логіка підтвердження траси	M/N	3/4
Кількість пропусків до скидання траси, од.	Ndrop	3
Моделі IMM	—	CV; CT
Імовірність збереження моделі IMM	p11 = p22	0,95
Максимальна кутова швидкість розвороту, °/с	$\omega_{\max}$	25

Завантаження обчислювального тракту. Верифіковану за стендом модель (14) візуалізує карта завантаження на рис. 6. У розрахунковій точці (20 цілей, 2 Гц, схема JPDA) завантаження процесора становить

94,8 %, тобто система працює на межі обчислювальної спроможності без резерву на супутні задачі. Зниження темпу оновлення до 1,5 Гц зменшує завантаження до 71,8 %, однак пропорційно збільшує затримку доставлення даних; альтернативою є підвищення продуктивності процесора щонайменше на 30 % або кластеризація задачі асоціації, за якої JPDA застосовується лише всередині просторових кластерів зближених цілей, а між кластерами працює GNN. Максимальна відносна розбіжність між моделлю (14) та вимірюваннями сенда за критерієм (15) становить 9,6 % (у зоні понад 16 цілей), що підтверджує адекватність цифрового двійника.

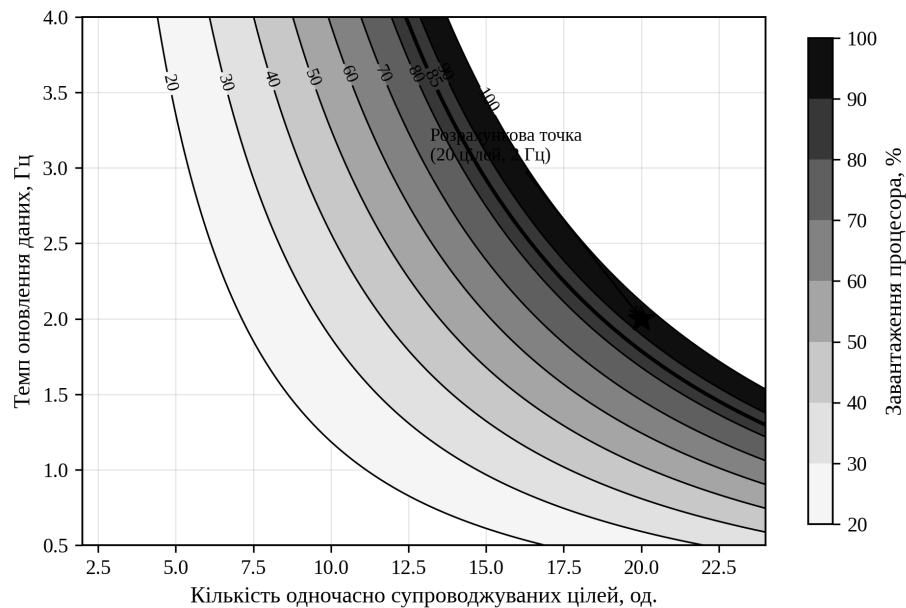


Рис. 6. Карта завантаження обчислювального тракту залежно від кількості цілей і темпу оновлення (схема JPDA)

Обговорення

Отримані результати кількісно підтверджують якісні висновки вітчизняних досліджень про те, що спостереження групових польотів БпЛА вимагає нарощування саме каналності та якості вторинного оброблення оглядових РЛС [1–3; 5]. Перевага JPDA над GNN за стійкістю супроводження у щільних групах узгоджується з класичними результатами теорії асоціації даних [11–13; 15]: зважене оновлення трас знижує чутливість до нерозділених відміток, але породжує відомий ефект злиття оцінок близьких цілей, який у наших експериментах проявився у 33 епізодах об'єднання трас на 50 прогонів сценарію S4. Зростання частоти перестановок трас у комбінованому сценарії відповідає результатам досліджень супроводження роїв когнітивними РЛС [20], де саме перемішування номерів трас визначає верхню межу корисності даних супроводження для подальших етапів оброблення повітряної обстановки.

Практично значущим є виявлений розрив між енергетичною та обчислювальною спроможністю станції: канал виявлення забезпечує формування відміток по 20 цілях, тоді як тракт асоціації за схемою JPDA вичерпує 94,8 % ресурсу процесора і не задовольняє ймовірнісну вимогу до затримки доставлення даних. Це зміщує акцент модернізації з антенно-фідерного тракту на обчислювальну платформу та алгоритмічну оптимізацію, що доповнює висновки [3] щодо напрямків модернізації РЛС радіотехнічних військ. Верифікованість моделі завантаження (розбіжність до 9,6 % за критеріального рівня 15 %) свідчить, що цифровий двійник придатний для прогнозування меж масштабування без натурних випробувань, у руслі підходів [26; 27].

Порівняння з міжнародними оглядами систем спостереження БпЛА [19; 21] показує, що отримані кількісні межі узгоджуються з загальною тенденцією: спроможність систем виявлення працювати саме з груповими сценаріями визначається обчислювальним трактом і алгоритмами асоціації, а не лише сенсорикою. Водночас запропонований підхід відрізняється тим, що всі показники прив'язані до конкретної апаратної платформи через верифіковану модель завантаження, що робить результати безпосередньо застосовними в технічних завданнях на модернізацію. Слід підкреслити й методичну роль метрики GOSPA: на відміну від окремих показників стійкості, вона агрегує похибки локалізації, пропуски та хибні траси в один функціонал, що спрощує регресійний контроль якості трека між версіями програмного забезпечення двійника.

Обмеження дослідження. По-перше, статистика отримана на 50 прогонах на конфігурацію, що забезпечує ширину інтервалу Вілсона для Ploss близько $\pm 0,02$ і є достатнім для порівняння схем, але не для сертифікаційних висновків. По-друге, мікродоплерівська селекція типів цілей у контурі трека використовувалася у спрощеному вигляді бінарної ознаки «мультиротатор/інше» за [22–25]; вплив повноцінного класифікатора на впорядкування трас за важливістю потребує окремого дослідження. По-третє, модель навмисних завад та імітувальних відміток у сценарії не включалася. По-четверте, коефіцієнти моделі (14)

ідентифіковано для конкретної обчислювальної платформи стенда; перенесення на іншу платформу вимагає повторної ідентифікації.

7. Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Цифровий двійник мобільної РЛС виявлення малорозмірних БпЛА розширено шаром багатоканального вторинного оброблення та генератором групових сценаріїв, що дозволило вперше виконати лабораторну верифікацію режиму одночасного супроводження до 20 цілей за чотирма типовими сценаріями групового прольоту з інтервалами між апаратами до 5 с і між підгрупами до 10 с.

2. Сформовано та реалізовано систему показників багатоканального супроводження: коефіцієнт стійкості траси, ймовірність зриву супроводження з інтервалом Вілсона, нормовану частоту хибного об'єднання відміток, метрику GOSPA та ймовірнісну вимогу до затримки доставлення даних. За результатами 50 прогонів на конфігурацію медіана коефіцієнта стійкості знижується з 0,978 (послідовне входження) до 0,921 (комбінований сценарій з 20 цілями), лишаючись вищою за критерій 0,90.

3. Показано, що схема асоціації JPDA у граничному комбінованому сценарії зменшує ймовірність зриву супроводження з 0,117 до 0,064 та частоту хибного об'єднання відміток з 10,9 до 5,7 на 100 зближень порівняно з GNN, ціною зростання часу оброблення огляду на 34 %. Домінантними помилками асоціації у щільних групах є перестановки та об'єднання трас, зумовлені нерозділеними відмітками.

4. Верифіковано модель завантаження обчислювального тракту (розбіжність зі стендом до 9,6 % за критеріального рівня 15 %): у розрахунковій точці 20 цілей за темпу 2 Гц схема JPDA використовує 94,8 % ресурсу процесора, а ймовірність доставлення даних споживачам за 150 мс становить лише 0,82 проти вимоги 0,95. Обґрунтовано вимоги до апаратури: резерв продуктивності процесора не менше 30 % або кластеризована схема асоціації зі збереженням темпу 2 Гц.

Перспективи подальших досліджень полягають в інтеграції до контуру трека повноцінного мікродоплерівського класифікатора типів цілей, у дослідженні кластеризованих та багатогіпотезних схем асоціації на розширеному складі групи (понад 20 цілей), а також у відтворенні в цифровому двійнику завадової обстановки та імітувальних відміток.

Фінансування. Дослідження виконано без зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Внесок авторів. Корченко О. Г., Корченко А. О., Волков Є. Г. – методологія дослідження; Прокопович-Ткаченко Д. І., Журов Ю. С. – розрахунки; Аскеров М. Г. огли – 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 використаних джерел

1. Очкурєнко 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: 10.30748/nitps.2024.55.07.
2. Очкурєнко 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 2. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2025. № 1(58). С. 46–65. DOI: 10.30748/nitps.2025.58.07.
3. Климченко В. Й., Тютюнник В. О., Арасланов М. Р., Тах'ян К. А. Можливі напрямки модернізації радіолокаційних станцій радіотехнічних військ з метою підвищення ефективності виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів. Системи озброєння і військова техніка. 2024. № 1(77). С. 16–21. DOI: 10.30748/soivt.2024.77.02.
4. Климченко В. Й., Тютюнник В. О., Арасланов М. Р., Тах'ян К. А. 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: 10.30748/soivt.2020.64.01.
5. Галкін Ю. О., Залевський Г. С., Токар О. А., Ярошук В. В. Радіолокаційне виявлення безпілотних літальних апаратів різної конструкції та розмірів: проблемні питання та шляхи їх вирішення. Системи обробки інформації. 2025. № 4(179). С. 7–25. DOI: 10.30748/soi.2024.179.01.
6. Карлов В. Д., Леонов І. Г., Кузнецов О. Л., Бесова О. В., Коржов А. М. Виявлення безпілотних літальних апаратів з використанням їх радіоліній зв'язку. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2025. № 1(58). С. 66–73. DOI: 10.30748/nitps.2025.58.08.
7. 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: 10.20535/RADAP.2021.87.46-55.
8. 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: 10.30748/zhups.2020.64.13.
9. Сургай М. В., Залевський Г. С., Горелишев С. А., Угринович О. І., Джус В. В. Вибір полоси частот зондувального сигналу, відповідної максимальному рівню вторинного випромінювання об'єктів заданих типів. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2021. № 2(68). С. 72–79. DOI: 10.30748/zhups.2021.68.09.
10. Reid D. B. An algorithm for tracking multiple targets. IEEE Transactions on Automatic Control. 1979. Vol. 24, No. 6. P. 843–854. DOI: 10.1109/TAC.1979.1102177.
11. Fortmann T. E., Bar-Shalom Y., Scheffe M. Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1983. Vol. 8, No. 3. P. 173–184. DOI: 10.1109/JOE.1983.1145560.

12. Chang K.-C., Bar-Shalom Y. Joint probabilistic data association for multitarget tracking with possibly unresolved measurements and maneuvers. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1984. Vol. 29, No. 7. P. 585–594. DOI: 10.1109/TAC.1984.1103597.
13. Blackman S. S. Multiple hypothesis tracking for multiple target tracking. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2004. Vol. 19, No. 1. P. 5–18. DOI: 10.1109/MAES.2004.1263228.
14. Blom H. A. P., Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1988. Vol. 33, No. 8. P. 780–783. DOI: 10.1109/9.1299.
15. Bar-Shalom Y., Daum F., Huang J. The probabilistic data association filter. *IEEE Control Systems Magazine*. 2009. Vol. 29, No. 6. P. 82–100. DOI: 10.1109/MCS.2009.934469.
16. Bar-Shalom Y., Blackman S. S., Fitzgerald R. J. Dimensionless score function for multiple hypothesis tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2007. Vol. 43, No. 1. P. 392–400. DOI: 10.1109/TAES.2007.357141.
17. Kuhn H. W. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly*. 1955. Vol. 2, No. 1–2. P. 83–97. DOI: 10.1002/nav.3800020109.
18. Rahmathullah A. S., García-Fernández Á. F., Svensson L. Generalized optimal sub-pattern assignment metric. *Proceedings of the 20th International Conference on Information Fusion (FUSION 2017)*. Xi'an, 2017. P. 182–189. DOI: 10.23919/ICIF.2017.8009645.
19. Khawaja W., Ezuma M., Semkin V., Erden F., Ozdemir O., Guvenc I. A survey on detection, classification, and tracking of UAVs using radar and communications systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2025. Early Access. DOI: 10.1109/COMST.2025.3554613.
20. 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. Art. 470. DOI: 10.3390/drones7070470.
21. Gao C. et al. Research on anti drone swarm technology based on complex urban environment. *Proceedings of the 2023 International Conference on Network, Multimedia and Information Technology (NMITCON)*. Bengaluru, 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/NMITCON58196.2023.10275854.
22. 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: 10.1017/S1759078714000282.
23. Björklund S., Wadströmer N. Target detection and classification of small drones by deep learning on radar micro-Doppler. *Proceedings of the 2019 International Radar Conference (RADAR)*. Toulon, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/RADAR41533.2019.171294.
24. Ritchie M., Fioranelli F., Griffiths H., Torvik B. Monostatic and bistatic radar measurements of birds and micro-drone. *Proceedings of the 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. Philadelphia, 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/RADAR.2016.7485181.
25. Harmanny R. I. A., de Wit J. J. M., Prémel-Cabic G. Radar micro-Doppler mini-UAV classification using spectrograms and cepstrograms. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2015. Vol. 7, No. 3–4. P. 469–477. DOI: 10.1017/S1759078715001002.
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. Art. 2863. DOI: 10.3390/rs16152863.
27. Blachnik M., Przyłucki R., Golak S., Ściegienka P., Wiecek T. 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. Art. 6806. DOI: 10.3390/s23156806.

References

1. Ochkurenko, O. V., Tarshyn, V. A., Sadovyi, K. V., Zots, F. F., Kuzhel, I. Ye., & Holubok, M. H. (2024). Proposals for the structure of radar stations for detecting unmanned aerial vehicles of tactical and operational-tactical level. Part 1. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 2(55), 64–75. <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.55.07> [in Ukrainian]
2. Ochkurenko, O. V., Tarshyn, V. A., Sadovyi, K. V., Zots, F. F., Kuzhel, I. Ye., & Holubok, M. H. (2025). Proposals for the structure of radar stations for detecting unmanned aerial vehicles of tactical and operational-tactical level. Part 2. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 1(58), 46–65. <https://doi.org/10.30748/nitps.2025.58.07> [in Ukrainian]
3. Klymchenko, V. Y., Tiutiunyk, V. O., Araslanov, M. R., & Takhian, K. A. (2024). Possible directions of modernization of radar stations of radio engineering troops to increase the efficiency of detection of small unmanned aerial vehicles. *Systems of Arms and Military Equipment*, 1(77), 16–21. <https://doi.org/10.30748/soivt.2024.77.02> [in Ukrainian]
4. Klymchenko, V. Y., Tiutiunyk, V. O., Araslanov, M. R., & Takhian, K. A. (2020). Analysis of the use of UAVs in the Armenian-Azerbaijani military conflict and possible ways to combat them. *Systems of Arms and Military Equipment*, 4(64), 7–17. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.64.01> [in Ukrainian]
5. Halkin, Yu. O., Zalevskiy, H. S., Tokar, O. A., & Yaroshchuk, V. V. (2025). Radar detection of unmanned aerial vehicles of various designs and sizes: problematic issues and ways to solve them. *Information Processing Systems*, 4(179), 7–25. <https://doi.org/10.30748/soi.2024.179.01> [in Ukrainian]
6. Karlov, V. D., Leonov, I. H., Kuznietsov, O. L., Biesova, O. V., & Korzhov, A. M. (2025). Detection of unmanned aerial vehicles using their radio communication links. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 1(58), 66–73. <https://doi.org/10.30748/nitps.2025.58.08> [in Ukrainian]
7. Sokolskyi, S. O., & Movchaniuk, A. V. (2021). Review of methods for detection and localization of small unmanned aerial vehicles. *Visnyk NTUU KPI. Seriya Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia*, 87, 46–55. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.87.46-55> [in Ukrainian]
8. Kamaltynov, H. H., & Kolesnik, O. M. (2020). Trends in the development of radar means of airspace control. *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, 2(64), 89–95. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.64.13> [in Ukrainian]
9. Surhai, M. V., Zalevskiy, H. S., Horelyshev, S. A., Uhrynovych, O. I., & Dzhus, V. V. (2021). Selection of the frequency band of the sounding signal corresponding to the maximum level of secondary radiation of objects of given types. *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, 2(68), 72–79. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.68.09> [in Ukrainian]
10. Reid, D. B. (1979). An algorithm for tracking multiple targets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 24(6), 843–854. <https://doi.org/10.1109/TAC.1979.1102177>

11. Fortmann, T. E., Bar-Shalom, Y., & Scheffe, M. (1983). Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 8(3), 173–184. <https://doi.org/10.1109/JOE.1983.1145560>
12. Chang, K.-C., & Bar-Shalom, Y. (1984). Joint probabilistic data association for multitarget tracking with possibly unresolved measurements and maneuvers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 29(7), 585–594. <https://doi.org/10.1109/TAC.1984.1103597>
13. Blackman, S. S. (2004). Multiple hypothesis tracking for multiple target tracking. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 19(1), 5–18. <https://doi.org/10.1109/MAES.2004.1263228>
14. Blom, H. A. P., & Bar-Shalom, Y. (1988). The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 33(8), 780–783. <https://doi.org/10.1109/9.1299>
15. Bar-Shalom, Y., Daum, F., & Huang, J. (2009). The probabilistic data association filter. *IEEE Control Systems Magazine*, 29(6), 82–100. <https://doi.org/10.1109/MCS.2009.934469>
16. Bar-Shalom, Y., Blackman, S. S., & Fitzgerald, R. J. (2007). Dimensionless score function for multiple hypothesis tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 43(1), 392–400. <https://doi.org/10.1109/TAES.2007.357141>
17. Kuhn, H. W. (1955). The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 2(1–2), 83–97. <https://doi.org/10.1002/nav.3800020109>
18. Rahmathullah, A. S., García-Fernández, Á. F., & Svensson, L. (2017). Generalized optimal sub-pattern assignment metric. In *Proceedings of the 20th International Conference on Information Fusion (FUSION 2017)* (pp. 182–189). IEEE. <https://doi.org/10.23919/ICIF.2017.8009645>
19. Khawaja, W., Ezuma, M., Semkin, V., Erden, F., Ozdemir, O., & Guvenc, I. (2025). A survey on detection, classification, and tracking of UAVs using radar and communications systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/COMST.2025.3554613>
20. Khawaja, W., Yaqoob, Q., & Guvenc, I. (2023). RL-based detection, tracking, and classification of malicious UAV swarms through airborne cognitive multibeam multifunction phased array radar. *Drones*, 7(7), 470. <https://doi.org/10.3390/drones7070470>
21. Gao, C., et al. (2023). Research on anti drone swarm technology based on complex urban environment. In *Proceedings of the 2023 International Conference on Network, Multimedia and Information Technology (NMITCON)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NMITCON58196.2023.10275854>
22. Molchanov, P., Harmanny, R. I. A., de Wit, J. J. M., Egiazarian, K., & Astola, J. (2014). Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 6(3–4), 435–444. <https://doi.org/10.1017/S1759078714000282>
23. Björklund, S., & Wadströmer, N. (2019). Target detection and classification of small drones by deep learning on radar micro-Doppler. In *Proceedings of the 2019 International Radar Conference (RADAR)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RADAR41533.2019.171294>
24. Ritchie, M., Fioranelli, F., Griffiths, H., & Torvik, B. (2016). Monostatic and bistatic radar measurements of birds and micro-drone. In *Proceedings of the 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.7485181>
25. Harmanny, R. I. A., de Wit, J. J. M., & Prémel-Cabic, G. (2015). Radar micro-Doppler mini-UAV classification using spectrograms and cepstrograms. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 7(3–4), 469–477. <https://doi.org/10.1017/S1759078715001002>
26. Liu, H., Yan, H., Hao, J., Xu, W., Min, Z., & Zhu, D. (2024). Application of digital twin technology in synthetic aperture radar ground moving target intelligent detection system. *Remote Sensing*, 16(15), 2863. <https://doi.org/10.3390/rs16152863>
27. Blachnik, M., Przyłucki, R., Gólak, S., Ściegienia, P., & Wiecek, T. (2023). 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*, 23(15), 6806. <https://doi.org/10.3390/s23156806>

Надійшла до редакції: 13.06.2026

Прийнята до друку: 15.09.2026

Опубліковано: 30.09.2026