

УДК 621.396.96

Д.А. Лахтир, О.В. Бушма, О.Є. Волков

ОЦІНКА ДАЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ РАДІОЛОКАЦІЙНИМИ ЗАСОБАМИ В РАЙОНАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Лахтир Данило Андрійович

Інститут інформаційних технологій і систем, м. Київ, Україна,
<https://orcid.org/0009-0003-8696-466X>

danilkovnir@gmail.com

Бушма Олександр Володимирович

Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, м. Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0003-1604-6129>

o.bushma@kubg.edu.ua

Волков Олександр Євгенович

Інститут інформаційних технологій і систем, м. Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-5418-6723>

alexvolk@ukr.net

Поширення застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА), зокрема в районах, наближених до аеропортів або критичної інфраструктури, висуває нові вимоги до їх виявлення засобами радіолокації. У статті проаналізовано отримання даних щодо ефективної площі розсіювання для моделей БПЛА літакового типу з різним розміщенням крила відносно фюзеляжу. Порівнюється радіолокаційна помітність БПЛА типу низькоплан, середньоплан та високоплан у разі спостереження радаром з частотою сигналу 2,8 ГГц. Розрахунок ефективної площі розсіювання здійснюється за допомогою методу обчислювального електромагнітного моделювання із застосуванням програмного забезпечення Altair Feko. Побудовано відповідні тривимірні геометричні моделі БПЛА методом полігональної сітки. На основі моделювання проводиться оцінка дальності виявлення БПЛА залежно від ракурсу спостереження та різних погодних умов. Отримані результати заповнюють прогалини серед наявних досліджень на цю тему та підтверджують визначальний вплив конструктивних особливостей БПЛА на дальність його виявлення радаром. Визначено, що у разі погіршення погодних умов через густий туман дальність виявлення БПЛА радаром значно зменшується.

Ключові слова: радіолокація, радар, ефективна площа розсіювання, обчислювальне електромагнітне моделювання, комп'ютерне моделювання, безпілотні літальні апарати, аеропорти, безпека повітряного руху.

Вступ

Проблема виявлення малорозмірних, низькошвидкісних та радіолокаційно малопомітних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) сьогодні є однією з ключових для систем повітряного спостереження, охорони та безпеки повітряного простору критичної інфраструктури. Такі БПЛА мають невелику ефективну площу розсіювання (ЕПР), виготовлені з матеріалів зі слабким відбиттям радіохвиль або з неметалевих компонентів. Водночас швидкість їх польоту, висота й режим руху можуть бути низькими або мінливими. Внаслідок цього традиційні радарні системи часто не здатні забезпечити надійне виявлення таких об'єктів через те, що радіолокаційні сигнали від них можуть губитися на тлі шумів або природного фону середовища, де сигнали змішуються з відбиттями від рослинності та біологічних цілей. У традиційних радіолокаційних рішеннях такі об'єкти зазвичай класифікуються як шумові та автоматично відкидаються. Це призводить до безпекових ризиків в аеропортах та ризиків зіткнення БПЛА з повітряними суднами [1–4].

Експериментальні вимірювання ЕПР забезпечують високу точність отриманих даних щодо конкретних зразків БПЛА, однак їх застосування пов'язане зі значними витратами. Для таких досліджень потрібні спеціалізовані радари, повномасштабні або модельні зразки апаратів, а також лабораторії чи полігони, здатні забезпечити контроль умов. Додаткові корекції, зокрема екстраполяційні алгоритми, застосовуються для зменшення похибок і компенсації обмежень вимірювального середовища. Внаслідок цього експериментальний підхід ефективний, але витратний і малоприматний для швидкого аналізу та масштабування, що підсилює роль комп'ютерного моделювання як більш доступного та гнучкого інструменту [5–7].

Більшість досліджень у галузі моделювання радіолокаційної помітності традиційно зосереджено на бойових літаках з розвиненими технологіями зниження ЕПР. Незважаючи на відмінності в масштабах і конструктивних рішеннях, методи 3D-моделювання та електромагнітних розрахунків мають універсальний характер, оскільки дають змогу оцінювати внесок окремих елементів конструкції, аналізувати ефекти кутової залежності сигнатури та визначати ЕПР об'єктів для різних режимів. Завдяки цьому такі підходи можна ефективно застосовувати і у разі малих БПЛА для забезпечення узгодженості між експериментальними вимірюваннями та результатами комп'ютерного моделювання [8–12].

В узагальненому вигляді подолання проблеми низької помітності малих БПЛА можливе завдяки комплексному підходу, в якому поєднуються адаптивні алгоритми обробки сигналів, аналіз і моделювання радіолокаційної помітності об'єктів, розширення спектра характеристик для класифікації та інтеграція даних з різних сенсорних систем. За допомогою цих методів можна покращити виділення слабких сигналів, підвищити надійність виявлення цілей та отримати необхідний рівень безпеки повітряного простору [4, 13–15].

У реалізації комплексного підходу комп'ютерне моделювання відіграє ключову роль у розробці ефективних систем виявлення малорозмірних БПЛА. Його застосування дає змогу імітувати радіолокаційні сигнали, поведінку дронів і умови навколишнього середовища без необхідності проводити дорогі експериментальні вимірювання. У такий спосіб можна оцінити ЕПР різних конструкцій БПЛА, проаналізувати вплив матеріалів, геометричних параметрів планера та режимів польоту на радіолокаційні сигнали, а також оптимізувати алгоритми обробки даних. За допомогою цих підходів можна тестувати різні сценарії виявлення, перевіряти адаптивні алгоритми, визначати оптимальні конфігурації сенсорних систем та інтегрувати декілька типів давачів для підвищення надійності. У результаті ком-

п'ютерне моделювання стає інструментом для прогнозування продуктивності систем безпеки, зменшення ймовірності пропуску цілей і прискорення розробки комплексних рішень для контролю повітряного простору [15–17].

Дослідження комп'ютерних моделей малорозмірних БПЛА дають змогу оцінити характеристики розсіювання радіолокаційних сигналів, а також вплив різних компонентів та матеріалів на ЕПР. Такі дослідження достатньо універсальні, і у разі їх застосування можна порівняти ЕПР моделей БПЛА літакового типу та квадрокоптерів різних конструкцій, а також оцінити дальність виявлення БПЛА радіолокаційними системами в районах критичної інфраструктури [2, 3, 18].

Використання різних конструкцій та матеріалів для побудови БПЛА створює значну варіативність їх ефективної радіолокаційної поверхні. У контрольованому повітряному просторі критичної інфраструктури поява малорозмірних БПЛА вказує на підвищені ризики, що можливі у разі негативного впливу на наявні об'єкти та витоку конфіденційної інформації. Це робить актуальним отримання більш точних прогнозних оцінок щодо дальності виявлення БПЛА та зумовлює потребу в дослідженні найбільш розповсюджених конструктивних рішень в цьому напрямі.

Мета роботи — оцінка дальності виявлення малорозмірних БПЛА літакового типу різної конструкції в контрольованому повітряному просторі критичної інфраструктури на основі комп'ютерного моделювання.

Проведене дослідження показало, що моноплани, незалежно від конструкції, найкраще фіксуються з бортових ракурсів. У цьому разі теоретична дальність їх виявлення під час використання типового активного авіаційного радара ASR-9 [19] досягає в середньому 220 км та зменшується в 2,5–3 рази за наявності туману. Якщо спостереження ведеться спереду або ззаду, БПЛА фіксуються на відстані до 70 км в хороших погодних умовах. Оцінено вплив конструкції БПЛА на дальність виявлення у разі маневрування.

Методологія

Радіолокаційна помітність БПЛА оцінюється максимальною дальністю, яка дає змогу радару надійно розрізнити відбитий від об'єкта сигнал. Для контролю повітряної ситуації та моніторингу метеорологічних явищ у районах аеропортів найчастіше застосовується активний радар цивільної авіації ASR-9 [19]. До ключових характеристик ASR-9 належить робоча частота у діапазоні 2,7–2,9 ГГц, яка визначає взаємодію сигналу з поверхнями БПЛА та впливає на величину ЕПР. Пікова потужність формує енергетичний потенціал імпульсу, характеризує дальність виявлення цілі та складає у ASR-9 1,1 МВт. Коефіцієнт підсилення антени 34 дБ відображає ступінь фокусування випромінювання у вибраному напрямку. Чутливість приймача задає мінімальний рівень сигналу, що може бути відокремлений від шуму, та дорівнює 108 дБм [19].

Сукупність зазначених параметрів формує вхідні дані для обчислення максимальної дистанції виявлення цілі з відомою ЕПР. Для цього застосовується класичне рівняння радіолокаційної дальності, за допомогою якого можна отримати теоретичну оцінку граничних можливостей радіолокаційної станції щодо виявлення малорозмірних повітряних об'єктів [20]:

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma}{P_{\min} (4\pi)^3}}, \quad (1)$$

де P_s — потужність випромінювання (Вт), G — коефіцієнт підсилення антени, λ — довжина хвилі (м), σ — ЕПР цілі (м²), P_{\min} — найменша приймана потужність (чутливість приймача) (Вт).

У рівнянні не враховується затування сигналу в земній атмосфері, яке виникає через молекулярне поглинання та зменшує реальну дальність виявлення. Коефіцієнт затування залежить від частоти радіохвилі, вмісту водяної пари та інтенсивності опадів [21]. Найбільш цікавими з практичного погляду є такі умови: у разі ясної погоди — сухе повітря без опадів, а у разі погіршення — наявність густого туману. Для врахування атмосферного поглинання до рівняння радіолокації додається множник $e^{-\alpha R_{\max}}$, де α — коефіцієнт одностороннього затування, що вимірюється в дБ/км [22].

Тоді з (1) з огляду на атмосферне поглинання одержуємо

$$R_{\max}^4 = \frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma e^{-2\alpha R_{\max}}}{P_{\min} (4\pi)^3}. \quad (2)$$

Після підстановки $k = \frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma}{P_{\min} (4\pi)^3}$ та $y = \frac{1}{2} \alpha R_{\max}$ рівняння (2) набуває вигляду

$$y \cdot e^y = \frac{1}{2} \alpha \sqrt[4]{k}. \quad (3)$$

Для оцінки значення R_{\max} скористаємося W -функцією Ламберта, властивості якої дають змогу знайти дальність виявлення цілі радіолокатором з рівняння (3) [23].

З огляду на властивості W -функції, якщо $ye^y = x$, то $y = W(x)$. Тоді

$$y = W\left(\frac{1}{2} \alpha \sqrt[4]{k}\right).$$

Повернемося до початкових змінних та отримаємо оцінку дальності з урахуванням атмосферного поглинання:

$$R_{\max} = \frac{2}{\alpha} W\left(\frac{\alpha}{2} \sqrt[4]{\frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma}{P_{\min} (4\pi)^3}}\right). \quad (4)$$

У подальших розрахунках використаємо коефіцієнти затування 0,01 та 0,1 дБ/км на частоті 2,8 ГГц для умов ясної погоди та густого туману відповідно [21].

Практичний інтерес представляє дослідження радіолокаційної помітності розповсюджених варіантів аеродинамічної схеми БПЛА літакового типу, в якій компоновання крила за висотою розташування відносно фюзеляжу є змінним. Доцільно розглянути найбільш поширені конфігурації, які безпосередньо впливають на формування діаграми розсіювання та варіативність ЕПР у різних ракурсах. Як приклади таких аеродинамічних схем обрано високоплан, середньоплан і низькоплан, кожен з яких формує власний спектр радіолокаційних ознак та демонструє різний рівень помітності залежно від умов спостереження [24, 25].

Для оцінки дальності виявлення малорозмірних БПЛА літакового типу різної конструкції створено 3D-моделі високоплана, середньоплана і низькоплана (рис. 1, а–в відповідно) з типовими геометричними характеристиками: розмах крила — 2 м, площа крила — $0,37 \text{ м}^2$, середня аеродинамічна хорда — 0,19 м, довжина фюзеляжу — 1,53 м.

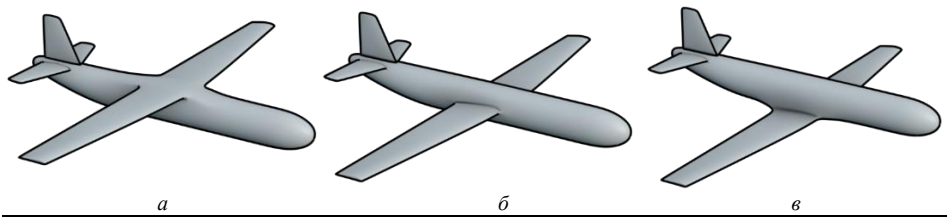


Рис. 1

Використані для дослідження 3-D моделі, представлені на рис. 1, *a–в*, побудовано методом полігонального моделювання, що розбиває поверхні складної форми на плоскі трикутні елементи. Кожна модель складається з близько 29 тис. таких часток, що забезпечує достатню точність моделювання за рахунок малих розмірів окремих елементів поверхні. Поверхня БПЛА моделюється як ідеальний провідник. Такий підхід дає змогу спростити обчислення та наблизити результати до характеристик розсіювання БПЛА з металевою обшивкою.

Для дослідження використано програмне середовище високочастотного електромагнітного моделювання Altair Feko, яке ґрунтується на розв'язанні рівнянь Максвелла за допомогою чисельних методів [25]. Програмна платформа дає змогу працювати з полігональними 3D-моделями та отримати графіки ЕПР. Також застосовано метод геометричної оптики з виведенням променів RL-GO (Ray Launching Geometrical Optics), який розроблено для випадків моделювання великих (більше за 20λ) металевих або діелектричних структур [25]. Оскільки RL-GO є методом наближених обчислень, він потребує значно менших обчислювальних ресурсів для моделювання, ніж інтегральні методи. У разі його застосування можна виконувати потрібні розрахунки значно швидше з достатньою точністю результатів, що відповідає розв'язку задач розсіювання, зокрема дослідженню ЕПР [25, 26].

Для оцінки дальності виявлення БПЛА моделюється його опромінення активним радаром з різних ракурсів спостереження щодо отримання спрямованої діаграми відбитого сигналу. Розглядається ситуація, коли джерело сигналу та приймач знаходяться в одному місці. За допомогою комп'ютерного моделювання можна отримати графіки спрямованості ЕПР для різних кутів падіння сигналу. Для побудованих 3D-моделей досліджено ЕПР в горизонтальній та фронтальній проєкціях. Графік ЕПР в горизонтальній проєкції дає змогу охарактеризувати дальність виявлення БПЛА у разі його польоту з різних напрямків відносно радара, а у фронтальній — залежно від кутової висоти БПЛА. Хоча наземними радарними БПЛА літакового типу під час горизонтального польоту спостерігаються з нижньої півсфери, у разі виконання маневрів та віражів з різним кутом крену БПЛА можуть мати таку просторову орієнтацію щодо радара, коли радіосигнал падає зі сторони верхньої півсфери БПЛА. Тому для оцінки дальності виявлення БПЛА необхідні дані спрямованості ЕПР з усіх ракурсів спостереження — і з нижньої, і з верхньої півсфер. Відповідно, моделювання проводиться для отримання діаграм направленості з діапазонами кутів від 0° до 360° з кроком в $0,2^\circ$.

Результати моделювання

На рис. 2–4 зображено графіки спрямованості ЕПР, отримані для високоплана, середньогоплана та низькоплана відповідно у горизонтальній (*a*) та фронтальній (*b*) проєкціях. Побудову графіків виконано в полярних координатах, завдяки чому можна наочно оцінити залежність радіолокаційної помітності БПЛА від кута падіння радіохвиль. Значення ЕПР наведено у логарифмічній шкалі (дБ), що дає змогу краще візуалізувати як основні, так і вторинні піки розсіювання. Для порівняння на рис. 5, *a–b* зазначені графіки у горизонтальній та фронтальній проєкціях відповідно накладаються один на одного в одній системі координат.

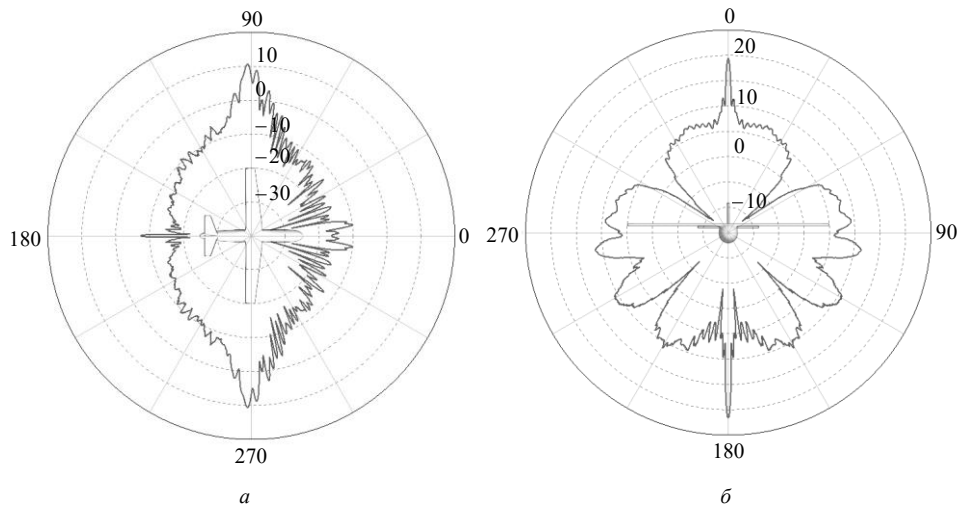


Рис. 2

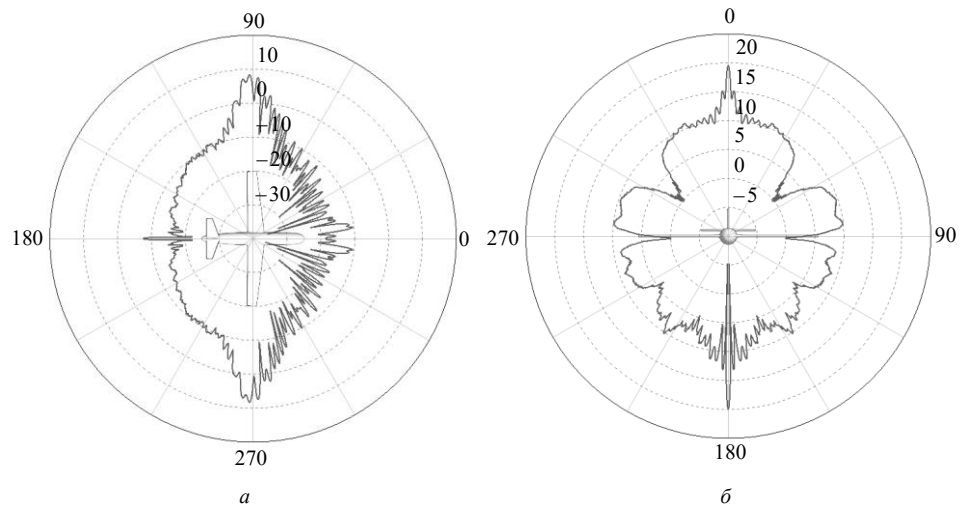


Рис. 3

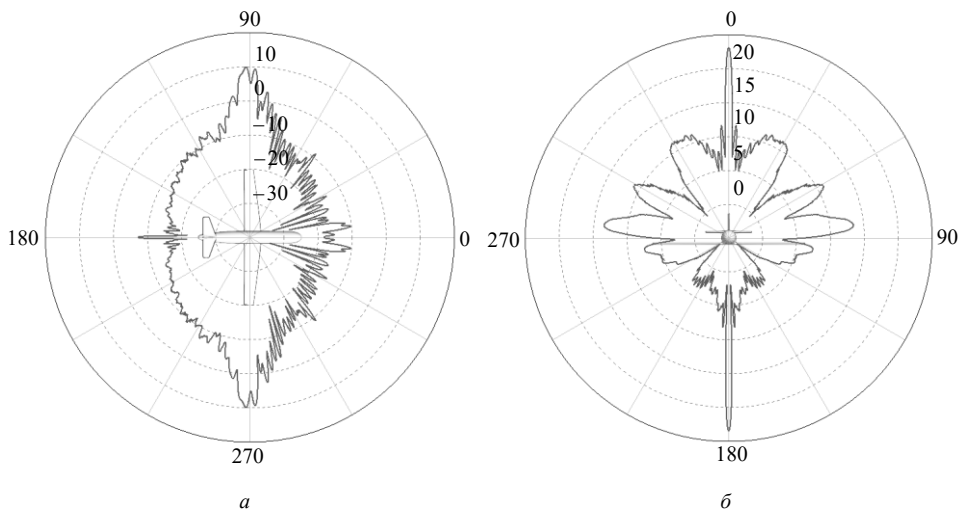


Рис. 4

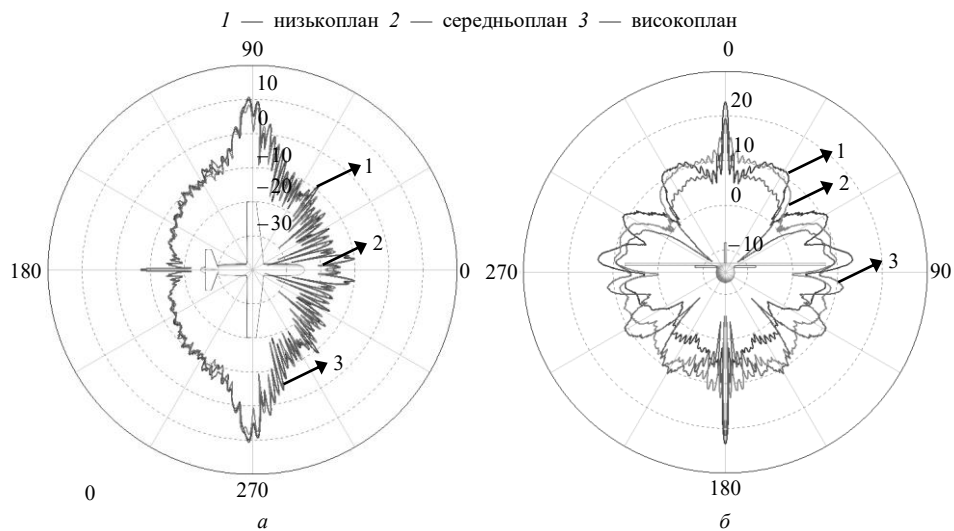


Рис. 5

Значення ЕПР можуть сильно відрізнятися залежно від кута падіння променів. Відповідно, для характеристики отриманих даних недостатньо застосовувати одну величину, таку як середнє чи максимальне значення. Для аналізу спрямованості ЕПР графіки розділено на сектори з кутом 15° та підраховано середнє значення ЕПР для кожного сектора. Оскільки моделі БПЛА симетричні відносно вертикальної площини, що проходить через поздовжню вісь БПЛА, графіки ЕПР також мають вісь симетрії. Тому для аналізу спрямованості достатньо розглянути значення від 0° до 180° .

На основі отриманих значень ЕПР із застосуванням формули (4) можна побудувати графіки залежності дальності виявлення від кута спостереження. Таке графічне подання інформації дає змогу наочно оцінити дальність виявлення БПЛА конкретним радаром. На рис. 6, 7 порівнюються значення дальності виявлення за різних погодних умов для горизонтальної та фронтальної проєкцій відповідно. В умовах туману помітність БПЛА різко погіршується, водночас максимальні значення дальності виявлення зменшуються більше, ніж мінімальні.

1 — високоплан 2 — середньоплан 3 — низькоплан 4 — високоплан (туман) 5 — середньоплан (туман) 6 — низькоплан (туман)

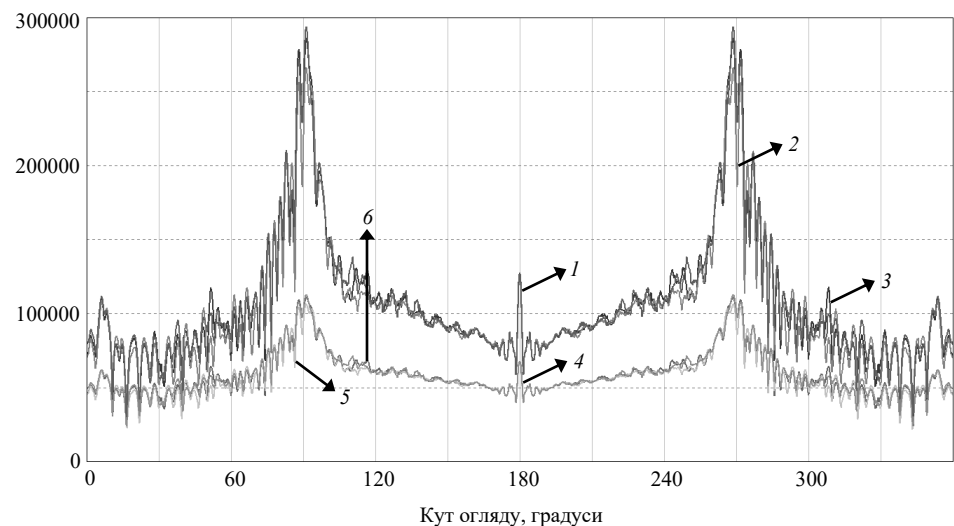


Рис. 6

1 — високоплан 2 — середньоплан 3 — низькоплан 4 — високоплан (туман) 5 — середньоплан (туман) 6 — низькоплан (туман)

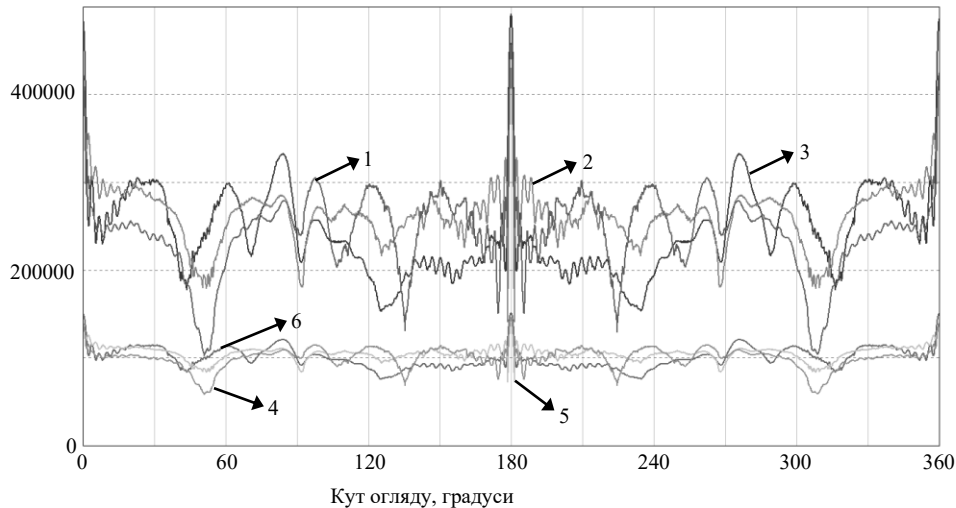


Рис. 7

Інтерпретація отриманих даних

У результаті моделювання отримано графіки ЕПР в горизонтальній та фронтальній проекціях для трьох моделей БПЛА. Для порівняння результатів графіки розбито на сектори з кутом 15° . У кожному секторі обчислено середні значення ЕПР. Також для кожної моделі підраховано середнє, максимальне та мінімальне значення ЕПР загалом.

Отримані значення дальності виявлення БПЛА радаром — це теоретичний максимум, розрахований за рівнянням радіолокації з огляду на характеристики конкретного радара та з урахуванням атмосферного поглинання даної частоти сигналу. В цих обчисленнях не враховувалися деякі фактори, такі як радіогоризонт, ефекти відбиття від земної поверхні та ін., що можуть призвести до втрат потужності сигналу. У разі практичного застосування дальність виявлення БПЛА може бути значно нижчою, особливо якщо вони рухаються на низьких висотах. У даній статті використовуємо отримані значення дальності виявлення як кількісну характеристику для порівняння моделей БПЛА.

З огляду на порівняння графіків ЕПР в горизонтальній проекції (рис. 5, а) можна зробити висновок, що зміна розміщення крила (від низькоплана до високоплана) має незначний вплив на ЕПР в даній проекції. Всі три графіки практично повністю накладаються. Це відбувається через те, що геометричні параметри фюзеляжу й форма крила залишаються незмінними. Оскільки положення крила змінюється лише за висотою, це має низький вплив на горизонтальну проекцію БПЛА. Згідно з аналізом спрямованості графіків найнижчу помітність БПЛА має у разі спостереження спереду та ззаду, в діапазоні азимутів 0° – 75° та 105° – 180° . За умови спостереження з цих напрямків ЕПР залишається досить низькою, в діапазоні $0,02$ – $0,15 \text{ м}^2$. Якщо спостереження ведеться з боків БПЛА, ЕПР різко зростає та набуває свого максимального значення з азимутом близько 91° . У діапазоні азимутів 75° – 120° середня ЕПР набуває значень $1,58$ – $2,55 \text{ м}^2$ з піковими значеннями до $11,33 \text{ м}^2$. Це зумовлює збільшення дальності виявлення БПЛА в два–три рази — коли БПЛА спостерігається з правого чи лівого борту, теоретична максимальна дальність виявлення може досягати 220 км, а у разі спостереження спереду чи ззаду дальність виявлення може зменшуватися до 70 км. Слід зазначити, що за максимальної ЕПР обчислена дальність виявлення сягає 293 км, а за мінімальної — 26,9 км. Однак ці значення існують лише в дуже вузьких секторах спостереження.

Аналіз графіків ЕПР у фронтальній проєкції (рис. 5, б) виявив значну відмінність між трьома моделями. Спільною характеристикою є значні піки у разі спостереження перпендикулярно знизу (180°) та зверху (0°). Для подальшого аналізу значення в цих напрямках слід ігнорувати через те, що за умови спостереження з землі БПЛА знаходиться в zenіті, прямо над радаром, а за умови спостереження з повітря — прямо під радаром. Аналіз даних ситуацій не несе важливого практичного значення. Спостереження з таких напрямків також можливе, якщо БПЛА виконує повороти зі значним креном та орієнтує відповідну сторону в напрямку радара. Однак імовірність даної події досить низька через вузькоспрямованість піків відбиття (в діапазоні кутів 1° – 2°). Також ЕПР трьох моделей мають наближені середні значення ($6,1$ – $7,75 \text{ м}^2$), але ці значення в різних секторах спостереження відрізняються. У контексті аеропортових радарів ЕПР в нижній півсфері має більше значення, оскільки радар спостерігатиме БПЛА більшу частину часу саме з нижньої півсфери.

У разі високоплана виявлено значне відбиття в нижній півсфері. У верхній півсфері відбиття зменшене, однак теж наявне. Якщо ігнорувати пікові значення, ЕПР в нижній півсфері приблизно вдвічі більше, ніж у верхній. У результаті дальність спостереження збільшується приблизно на 15 %. Також з графіка видно, що існують локальні вузькоспрямовані мінімуми ЕПР. Наприклад, у разі кута нахилу $135,3^\circ$ ЕПР різко падає до $0,25 \text{ м}^2$. Це відповідає зменшенню дальності виявлення БПЛА в 2–2,5 рази.

Порівняння ЕПР середньогоплана з іншими моделями виявило її більшу збалансованість. І в нижній, і в верхній півсферах спостерігається значне відбиття. У нижній півсфері ЕПР значно рівномірніша, практично немає локальних мінімумів, що приводить до більш надійного виявлення наземним радаром незалежно від кута нахилу. У верхній півсфері відбиття значно зменшується, якщо кути нахилу 45° – 55° , дальність виявлення БПЛА погіршується в 1,6 разів порівняно із середніми значеннями.

У разі низькоплана у нижній півсфері спостерігається помітно менше відбиття. На противагу цьому, відбиття у верхній півсфері збільшене. Якщо відкинути пікове відбиття, у разі порівняння з високопланом ЕПР низькоплана в нижній півсфері в середньому зменшується в три рази. Це відповідає погіршенню дальності виявлення БПЛА в 1,3 рази.

За поганих погодних умов, а саме поглинання сигналу частинками води в атмосфері (туман), дальність виявлення БПЛА значно зменшується. Внаслідок того, що ступінь поглинання сигналу збільшується з дальністю, максимальна відстань виявлення БПЛА може зменшуватися в 2,5–3,2 рази, хоча мінімальна — лише в 1,25–2 рази в умовах туману.

Висновок

Проведено комп'ютерне моделювання відбиття сигналу радара від моделей БПЛА з різною конструкцією (високоплан, середньоплан та низькоплан). Проаналізовано отримані значення ЕПР та теоретично розраховану дальність виявлення БПЛА радаром. У підсумку сформулюємо основні висновки.

— ЕПР в горизонтальній проєкції практично не залежить від розміщення крила за висотою за умови збереження всіх інших геометричних параметрів планера.

— Дані моделі БПЛА, побудовані за класичною аеродинамічною схемою, мають в два–три рази більшу дальність виявлення у разі спостереження з бортів, ніж з інших напрямків.

— За умови спостереження наземним радаром дальність виявлення високоплана приблизно в 1,3 рази більша порівняно з низькопланом.

— Середньоплан має найбільш рівномірний графік відбиття у разі спостереження наземним радаром. Значення дальності його виявлення знаходяться в межах між відповідними значеннями для низькоплана та високоплана.

— У разі низькоплана збільшується відбиття в верхній півсфері, але зменшується в нижній. З високопланом ситуація обернена — спостерігається збільшене відбиття в нижній півсфері, але зменшене в верхній. Щодо середньоплана, то ЕПР у верхній та нижніх півсферах однакова.

— Такі несприятливі погодні умови, як туман, можуть значно погіршувати дальність виявлення БПЛА радаром.

Результати моделювання дають змогу визначити закономірності формування ефективної площі розсіювання та дальності радіолокаційного виявлення БПЛА літакового типу залежно від ракурсу спостереження, висотного розміщення крила та зовнішніх умов. Отримані залежності підтверджують визначальний вплив геометричної конфігурації планера за схемою моноплана на просторовий розподіл радіолокаційної помітності.

Результати дослідження можна використовувати в галузі антидронових радарів для виявлення БПЛА в районах контрольованого повітряного простору або критичної інфраструктури. Отримані дані дають змогу оцінити дальність виявлення розглянутих типових моделей БПЛА у разі застосування радарів, що працюють на частоті близько 2,8 ГГц. Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні та доповненні даних за допомогою методів 3D- та обчислювального електромагнітного моделювання. Доцільним вбачаємо застосування подібних методів для аналізу БПЛА типу «літаюче крило» або квадрокоптер.

D. Lakhtyr, O. Bushma, O. Volkov

ASSESSMENT OF THE DETECTION RANGE OF SMALL UAVS BY RADAR IN AREAS OF CRITICAL INFRASTRUCTURE

Danylo Lakhtyr

Institute of Information Technologies and Systems, Kyiv, Ukraine,
danilkovnir@gmail.com

Oleksandr Bushma

Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine,
o.bushma@kubg.edu.ua

Oleksandr Volkov

Institute of Information Technologies and Systems, Kyiv, Ukraine,
alexvolk@ukr.net

The widespread use of unmanned aerial vehicles (UAVs), particularly in areas close to airports or critical infrastructure, places new demands on their detection by radar. The work focuses on the obtaining data on the radar cross section for models of UAVs of the aircraft type, with different wing placement relative to the fuselage. The work compares the radar visibility of UAVs of the low-plane, medium-plane and high-plane types, when observed by a radar with a signal frequency of 2.8 GHz. The calculation of the radar cross section was carried out by the method of computational electromagnetic modeling using Altair Feko software. The corresponding three-dimensional geometric models of UAVs

were constructed using the polygonal mesh method. Based on the modeling, the UAV detection range is estimated depending on the observation angle and under different weather conditions. The results of the work fill gaps in existing research on this topic and provide insight into the impact of UAV design on radar detection range. It has been determined that adverse weather conditions, such as thick fog, significantly reduce the radar detection range of UAVs.

Keywords: radiolocation, radar, radar cross section, computational electromagnetic modeling, computer modeling, unmanned aerial vehicles, airports, air traffic safety.

ПОСИЛАННЯ

1. Pate J.S., Fioranelli F., Anderson D. Review of radar classification and RCS characterisation techniques for small UAVs or drones. *IET Radar Sonar & Navigation*. 2018. Vol. 12, N 9. P. 911–919. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.0020>
2. Radar scattering characteristics of a UAV model in X-band / O. Sukharevsky, V. Vasylets, V. Orlenko, I. Ryapolov. *IET Radar Sonar & Navigation*. 2020. Vol. 14, N 4. P. 532–537. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0243>
3. 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 / I.K. Kapoulas, A. Hatziefremidis, A.K. Baldoukas, E.S. Valamontes, J.C. Statharas. *Drones*. 2023. Vol. 7, N 1. Art. 39. 26 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7010039>
4. mmHawkeye: passive UAV detection with a COTS mmWave radar / J. Zhang, X. Na, R. Xi, Y. Sun, Y. He. *arXiv*. 2023. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.06479>
5. Björklund S., Hermnäs H. Statistical analysis of the radar cross section of two small fixed-wing drones using typical flights. *IET Radar & Navigation*. 2024. Vol. 18, N 1. P. 125–136. DOI: <https://doi.org/10.1049/rsn2.12522>
6. Overview of RCS extrapolation techniques to aircraft targets / N.-J. Li, C.-F. Hu, L.-X. Zhang, J.-D. Xu. *Progress In Electromagnetics Research B (PIER B)*. 2008. Vol. 9. P. 249–262. DOI: <http://dx.doi.org/10.2528/PIERB08080706>
7. To L., Bati A., Hilliard D. Radar cross section measurements of small unmanned air vehicle systems in non-cooperative field environments. *Proceedings of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation*. Germany : Berlin, 23–27 March, 2009. P. 3637–3641.
8. Design exploration and optimization of aerodynamics and radar cross section for a fighter aircraft / Z.U.D. Taj, A. Bilal, M. Awais, S. Salamat, M. Abbas, A. Maqsood. *Aerospace Science and Technology*. 2023. Vol. 133. ID: 108114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108114>
9. Zhou Z, Huang J. Hybrid deflection of spoiler influencing radar cross-section of tailless fighter. *Sensors*. 2021. Vol. 21, N 24. ID: 8459. 19 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21248459>
10. Analysis of radar cross section and wave drag reduction of fighter aircraft / U.F. Barbosa, J. Costa, R. Munjulury, A. Abdalla. *Proceedings of the Aerospace Technology conference*. Sweden : Solna, Stockholm, 11–12 October, 2016. 13 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/312040564_Analysis_of_Radar_Cross_Section_and_Wave_Drag_Reduction_of_Fighter_Aircraft
11. Touzopoulos P., Boviatsis D., Zikidis K.C. 3D modelling of potential targets for the purpose of Radar Cross Section (RCS) prediction: based on 2D images and open source data. *2017 Proceedings of the 6th International Conference on Military Technologies (ICMT)*. Czech Republic : Brno, 31 May – 02 June 2017. P. 636–642. DOI: <https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2017.7988835>
12. Bravo-Mosquera P. D., Abdalla A.M., Catalano F.M. Evaluation of delta wing effects on the stealth-aerodynamic features for non-conventional fighter aircraft. *Proceedings of the 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*. Brazil : Belo Horizonte, 09–14 September 2018. URL: https://www.icas.org/icas_archive/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0199_paper.pdf
13. Oh B.-S., Guo X., Lin Z. A UAV classification system based on FMCW radar micro Doppler signature analysis. *Expert Systems with Applications*. 2019. Vol. 132. P. 239–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.007>
14. Measurement and analysis of radar-cross-section of UAV at 21–26 GHz frequency band / A. Hao, L. Ting, H. Danping, M. Yihua, D. Jianwu. *ZTE Communications*. 2025. Vol. 23, N 1. P. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.12142/ZTECOM.202501014>

15. Sumithra P., Thiripurasundari D. Review on Computational Electromagnetics. *Advanced Electromagnetics*. 2017. Vol 6, N 1. P. 42–55. DOI: <https://doi.org/10.7716/aem.v6i1.407>
16. Özdemir C. Radar cross section analysis of unmanned aerial vehicles using predics. *International Journal of Engineering and Geosciences*. 2020. Vol. 5, N 3. P. 144–149. DOI: <https://doi.org/10.26833/ijeg.648847>
17. Developing a technology for modeling radar portraits of complex-shape objects for intelligent recognition systems / M. Komar, A. Sieriebriakov, R. Tymchyshyn, S. Bondar. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3, N 9(129). P. 46–59. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305623>
18. Monostatic radar cross section of flying wing delta planforms / S.M. Vaitheeswaran, T.S. Gowthami, S. Prasad, Y. Bharadwaja. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2017. Vol. 20, N 2. P. 467–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2017.02.001>
19. Mahapatra P.R., Zrnic D.S. Sensors and systems to enhance aviation safety against weather hazards. *Proceedings of the IEEE*. 1991. Vol. 79, N 9. P. 1234–1267. DOI: <https://doi.org/10.1109/5.97295>
20. Bakare B.I., Ajaegbu M.U., Idigo V.E. A comprehensive review of radar system technology. *Journal of Electronics and Communication Engineering Research*. 2022. Vol. 8, N 8. P. 16–23. URL: <https://www.questjournals.org/jecer/papers/vol8-issue8/C08081623.pdf>
21. Banday Y., Mohammad Rather G., Begh G.R. Effect of atmospheric absorption on millimetre wave frequencies for 5G cellular networks. *IET Communications*. 2019. Vol. 13, N 3. P. 265–270. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-com.2018.5044>
22. Skolnik M.I. Introduction to radar systems. 2nd ed. New York : McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1981. P. 459. URL: <https://deebak.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/05/skolnik.pdf>
23. Veberič D. Lambert W function for applications in physics. *Computer Physics Communications*. 2012. Vol. 183, N 12. P. 2622–2628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.07.008>
24. Analyzing radar cross section signatures of diverse drone models at mmwave frequencies / V. Semkin, J. Haarla, T. Pairon, C. Slezak, S. Rangan, V. Viikari, C. Oestges. *IEEE Access*. Vol. 8. P. 48958–48969. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979339>
25. Altair® Feko®: solving connectivity, compatibility, and radar challenges. *Altair*. 2026. URL: <https://altair.com/feko>
26. Aguilar A.G., Jakobus U. Ray-Launching Geometrical Optics in FEKO: a summary of the last four years of intensive development. *2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium — China (ACES)*. China : Beijing, 29 July – 01 August 2018. P. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.23919/ACCESS.2018.8669256>

Отримано 03.02.2026. Прийнято до друку 30.03.2026. Опубліковано 25.04.2026.



Ця робота ліцензується відповідно до Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.