

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-32>

УДК 621.396:623.746.7:621.396.67:355.4:621.396.93

ЛЕЖНЬОВ ДЕНИСНаціональний університет "Запорізька політехніка"
аспірант кафедри «Інформаційні технології електронних засобів»<https://orcid.org/0009-0009-6835-2380>e-mail: lezhnevdenis@zp.edu.ua**РИБАКОВ КОСТЯНТИН**Національний університет "Запорізька політехніка"
аспірант кафедри «Програмні засоби»<https://orcid.org/0009-0007-7979-0410>e-mail: krybakov@zp.edu.ua

СТІЙКІСТЬ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ КЕРУВАННЯ БПЛА В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ: КОМБІНОВАНІ РІШЕННЯ З АВТОНОМНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ТА АДАПТИВНИХ АНТЕН

У статті розглянуто комбіновані рішення з автономної орієнтації та адаптивних антен у забезпеченні стійкості систем передачі керування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах радіоелектронної боротьби. Метою роботи є дослідження та аналіз проблеми підвищення стійкості систем передачі керування БПЛА в умовах радіоелектронної боротьби за допомогою комбінованих рішень з автономної орієнтації та адаптивних антен. Розглянуто класифікацію безпілотних літальних апаратів за режимом роботи та можливі перешкоди радіочастотного спектру, які впливають на стійкість передачі керування. Зазначено головною загрозою для систем керування є засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ), до яких віднесено: активні перешкоди; спуфінг; глушіння. Охарактеризовано основні компоненти автономної орієнтації як інерціальні навігаційні системи (ІНС), оптичні сенсори, магнітометри, алгоритми обробки даних. Досліджено, що для забезпечення високої точності та надійності навігації БПЛА застосовують комплексний підхід, що включає поєднання інерціальних навігаційних систем (ІНС), оптичних сенсорів, магнітометрів та алгоритмів обробки даних на основі штучного інтелекту (ШІ). Наведено приклади комбінованих рішень з автономної орієнтації БПЛА. Представлено можливості адаптивних антен у підвищенні стійкості систем передачі керування БПЛА в умовах радіоелектронної боротьби, за рахунок придушення перешкод, через формування вузькопрямованих пелюсток для мінімізації впливу джерел перешкод та через застосування алгоритмів адаптивного формування променя (beamforming). Впровадження адаптивних антенних решіток передбачає розвиток інших технологій, включаючи програмне забезпечення, певне радіо, когнітивне радіо, МІМО тощо. Складено алгоритмом дій оцінки ефективності та надійності розроблених методів для систем передачі керування БПЛА.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БПЛА), системи керування, радіоелектронна боротьба, активні перешкоди, спуфінг, глушіння, автономне орієнтування, комбіновані рішення, SLAM, GPS, LiDAR, придушення радіосигналів, адаптивні антени, когнітивне радіо, МІМО.

LEZHNOV DENYS**RYBAKOV KOSTIANTYN**

National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

RESILIENCE OF CONTROL TRANSMISSION SYSTEMS FOR UAVs UNDER ELECTRONIC WARFARE CONDITIONS: COMBINED SOLUTIONS FOR AUTONOMOUS ORIENTATION AND ADAPTIVE ANTENNAS

The article examines combined solutions for autonomous orientation and adaptive antennas to ensure the resilience of unmanned aerial vehicle (UAV) control transmission systems under electronic warfare conditions. The objective of the study is to investigate and analyze the problem of enhancing the resilience of UAV control transmission systems in electronic warfare conditions using combined solutions of autonomous orientation and adaptive antennas. The classification of UAVs based on their operating mode and possible radio frequency spectrum interferences affecting control transmission resilience is considered. The primary threat to control systems is identified as electronic warfare (EW) measures, including: active jamming, spoofing, signal blocking (jamming). The main components of autonomous orientation are described, including inertial navigation systems (INS), optical sensors, magnetometers, and data processing algorithms. The study finds that ensuring high accuracy and reliability of UAV navigation requires a comprehensive approach that integrates INS, optical sensors, magnetometers, and AI-based data processing algorithms. Examples of combined autonomous orientation solutions for UAVs are provided. The article presents the potential of adaptive antennas in improving the resilience of UAV control transmission systems in electronic warfare conditions. This is achieved by interference suppression through the formation of narrow directional beams to minimize the impact of interference sources and by implementing adaptive beamforming algorithms. The deployment of adaptive antenna arrays necessitates the development of other technologies, including software-defined radio, cognitive radio, MIMO, and more. An action algorithm has been developed to assess the effectiveness and reliability of the proposed methods for UAV control transmission systems.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAVs), control systems, electronic warfare, active interference, spoofing, jamming, autonomous orientation, combined solutions, SLAM, GPS, LiDAR, radio signal suppression, adaptive antennas, cognitive radio, MIMO.

Постановка проблеми

У сучасних військових і цивільних застосуваннях БПЛА є важливим елементом систем спостереження, розвідки, доставки вантажів та виконання інших критично важливих завдань. Однак в умовах активного використання РЕБ виникає загроза порушення стабільності зв'язку, що ставить під сумнів його ефективність. Вирішення проблеми лежить у площині створення систем, здатних адаптуватися до зовнішніх впливів та автономно забезпечувати зв'язок навіть в умовах інтенсивних

радіоперешкод. Це комплексне завдання вимагає як теоретичних досліджень для розробки нових підходів, так і практичної реалізації для забезпечення безпеки та ефективності роботи БПЛА в реальних умовах.

Аналіз останніх джерел

Дослідження сучасної проблематики з питань безпеки систем передачі керування БПЛА в умовах радіоелектронної боротьби висвітлюють вітчизняні провідні науковці, так і закордонні вчені. У роботі «Розвиток радіоелектронної боротьби в умовах війни із застосуванням дронів» автор проаналізував різні методи захисту каналу керування безпілотним літальним апаратом від впливу завад, які можуть виникнути під час виконання польотного завдання, з урахуванням особливостей маршруту та зони польоту. До таких заходів було віднесено – використання криптографічного захисту, що унеможливує їх перехоплення та дешифрування сторонніми особами. Дослідження також торкнулося питання організації періодичних перевірок технічного стану радіоелектронного обладнання з метою виявлення та усунення вразливостей, пов'язаних з радіоелектронною боротьбою [1].

Ряд публікацій присвячено досягненням сучасного штучного інтелекту (ШІ) у напрямку систем передачі керування БПЛА. Так, В. Нечипоренко підкреслює, що БПЛА має бути спроможний діяти самостійно, без постійного втручання оператора в умовах автономного польоту. Це передбачає наявність повної системи управління (СУ), яка дозволяє дрону приймати рішення та виконувати завдання в автономному режимі на основі методів нейронних мереж, до прикладу як NAS – RNN і агностичний мережевий алгоритм вибору архітектури (WANN), які забезпечують підвищення точності навігаційних систем та керування [2].

Сучасним рішенням для протидії впливу засобам РЕБ противника є когнітивне радіо, яке за допомогою аналізу радіоспектра виявляє вільні частотні діапазони, які не використовує противник для свого зв'язку, і динамічно переналаштовується на ці частоти, забезпечуючи стійкий зв'язок в умовах радіоелектронної боротьби. Технологія повторного використання спектра (spectral reuse) дозволяє ефективно використовувати радіочастотний ресурс, уникаючи перешкод і забезпечуючи більш надійний зв'язок. Крім того, завдяки постійному моніторингу спектру, когнітивне радіо може адаптуватися до змінних умов радіосередовища, що ще більше підвищує ефективність використання радіочастотного ресурсу. [3, с. 229].

Вітчизняні дослідники розглядали адаптивні антени як важливий елемент стійкості систем передачі керування БПЛА, через усунення поляризаційної неузгодженості та антенних систем. Було встановлено, що для підвищення швидкості передачі даних у цифрових радіорелейних системах ефективно застосовується технологія MIMO з використанням багатополосових поляризаційно-голографічних антен [4].

У статті [5] розглядається питання створення систем управління безпілотниками, які здатні функціонувати автономно навіть за умов втрати зв'язку з оператором та відсутності зовнішніх джерел інформації, таких як GPS або відеокамери. Також, наведено ключові методи автономної орієнтації, які дозволяють безпілотникам самостійно орієнтуватися в просторі – інерційні навігаційні системи (ІНС), комп'ютерний зір, методи обробки сигналів, штучний інтелект.

Зарубіжні вчені досліджували методи підвищення стійкості систем передачі керування БПЛА в умовах радіоелектронної боротьби, такі як методи пригнічення шуму для радіосигналів у системах зв'язку; відстеження візуальних міток для автоматичної посадки безпілотників; мережі для одночасного обміну даними між кількома дронами та наземною станцією, включаючи відеотрансляцію та команди керування; дослідження радіотехнічних параметрів двонаправленої системи зв'язку для безпілотників [6].

Забезпечення стійкості каналу передачі даних для управління безпілотником в умовах активної радіоелектронної боротьби вимагає розробки складних алгоритмів і технологій. Попри розвиток методів автономної орієнтації та адаптивних антен, питання стійкості управління БПЛА залишається актуальним і вимагає подальших розробок. Стабільність централізованих систем управління як GPS та GNSS, які є вразливі до перешкод типу спуфінг, теж залишається невирішеним питанням. Інерціальна навігаційна система (ІНС) частково вирішує завдання керування безпілотним літальним апаратом, але її використання обмежується зростанням похибки з часом та значною масою, що є ще однією проблемою для невеликих БПЛА. Відповідно використання ІНС вимагає комплексних рішень з підвищення її ефективності роботи в умовах радіоелектронної боротьби.

Тому, дослідження в цій галузі підкреслюють необхідність розробки інноваційних технологій для забезпечення надійного та безпечного управління безпілотниками в складних умовах, зокрема, за наявності радіоелектронних перешкод.

Метою роботи є: дослідження та аналіз проблеми підвищення стійкості систем передачі керування БПЛА в умовах радіоелектронної боротьби за допомогою комбінованих рішень з автономної орієнтації та адаптивних антен.

Виклад основного матеріалу

Застосування безпілотних авіаційних комплексів в умовах сучасних конфліктів значно підвищує ефективність ведення бойових дій. Завдяки здатності до тривалого автономного польоту та широкому спектру оснащення, БПЛА стали незамінним інструментом для розвідки, спостереження та вогневої підтримки. Їх ефективність значною мірою залежить від стійкості систем керування. Залежно від режиму

роботи БПЛА можна класифікувати як ручні, частково автономні та повністю автономні. Більшість традиційних застосувань безпілотних літальних апаратів (БПЛА) включають ручне дистанційне радіокерування польотом та його траєкторією. При цьому оператор налаштовує параметри контролера польоту, забезпечуючи стабільність і маневровість апарату. Найпоширенішим методом для цього є використання контуру керування ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор), який забезпечує три параметри, описані в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (ПІД)

Параметр	Призначення	Ефект
Пропорційний підсилювач	Вирішує поточну помилку	Збільшення параметра підвищує чутливість БПЛА. Занадто високе значення може ускладнити керування БПЛА.
Інтегратор	Виправляє минулі помилки	Збільшення значення зменшує коливання БПЛА. Занадто високе значення може зробити БПЛА занадто жорстким в управлінні.
Обчислювача похідна	Справляється з майбутніми помилками	Збільшення показника нейтралізує надмірну чутливість, спричинену параметром пропорційного посилення, що запобігає різким рухам. Занадто високе значення може викликати вібрацію в БПЛА, що призведе до перегріву.

Додатки, засновані на ручному управлінні, іноді передбачають передачу корисних сигналів, таких як відеозворотний зв'язок або інформація про місцеперебування. У таких сценаріях БПЛА можна виявити та нейтралізувати за допомогою різних методів глушіння радіочастотного спектру. Оскільки складність операцій, що виконують за допомогою безпілотних літальних апаратів, зростає, багато завдань перекладають на бортовий диспетчер польоту. Автономна система контролер за допомогою різних датчиків (інерційні вимірювальні пристрої, датчики тиску тощо) визначає поточний стан системи, підтримує її властивості (висота БПЛА). З іншого боку, застосування повністю автономної системи передбачатиме повне автономне виконання місії – не залежне від радіочастотних сигналів наземної станції, використовуючи приймачі глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS), таких як GPS. Такі системи можуть бути ідентифіковані та нейтралізовані за допомогою GNSS/GPS глушіння. У випадках повністю автономних додатків можливо, що БПЛА не передає сигнали, або стає важко надійно аналізувати радіочастотний спектр. При таких сценаріях, для виявлення неавторизованих БПЛА, використовують методи на основі радарів.

Відповідно, головною загрозою в умовах високотехнологічного поля бою та широкого впровадження цифрових технологій є засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ): перехоплення та втручання в комунікаційні сигнали; зміна орієнтації антен [7;8]. Все це спричиняє збій у системі керування безпілотними літальними апаратами через зміну радіосигналу або відтворення радіоперешкод. До таких перешкод можна віднести: активні перешкоди (створення сигналів із шумовими характеристиками); спуфінг (підміна сигналів GPS або керування); глушіння (придушення сигналу керування на частотах роботи БПЛА).

Тематичний аналіз, спрямований на оцінку потенційного впливу фальсифікації та глушіння GPS на продуктивність і безпеку автономних БПЛА на основі помилок позиціонування, дрейфу навігації та невдач місії через фальсифікацію та глушіння GPS, висвітлено через суттєві загрози продуктивності та безпеці БПЛА, що показано табл. 2 [9].

Таблиця 2

Вплив перешкод GPS на характеристики та безпеку БПЛА

Ключові показники	Перешкоди	Вплив на характеристики БПЛА
Помилка позиціонування	Через підробку GPS помилка в позиціонуванні зростає до 20 метрів	Значне відхилення від запланованих маршрутів
Помилка позиціонування	Через атаки GPS-спуфінгу відхилення від маршруту зростає до 15-20 метрів	Втрата точності навігації та контролю.
Навігаційний дрейф	У сценаріях створення перешкод навігаційний дрейф має відхилення від 15% до 25%	БПЛА відхиляється від курсу через перешкоди
Завершення місії, оцінка	Під час глушіння успіх місії знижується на 40%.	БПЛА повністю втрачає контроль
Завершення місії, оцінка	Спуфінг знизив успіх місії на 30%, оскільки БПЛА не може досягти цілей	БПЛА не зможе виконати завдання
Втрата контролю	У 25% випадків перешкоди призводять до втрати контролю під час підробки GPS.	Критична втрата контролю, що призводить до відхилення від плану місії
Контроль і безпека	Глушіння призводить до повної втрати контролю в критичних зонах.	БПЛА стають дуже вразливими, особливо у висотних місіях.
Час відновлення	Відновлення після спуфінгу відбувалося в середньому через 10-15 секунд після усунення перешкод.	Затримки у відновленні нормальної роботи після атаки.

Продовження таблиці 1

Режими відмови	35% БПЛА зазнають відключення системи або аварійної посадки під час створення перешкод.	Спостерігаються режими відмови з високим рівнем ризику; БПЛА не можуть самостійно відновлюватися.
Час відновлення від спуфінгу	Відновлення займало 5-10 секунд, коли доступні резервні системи навігації.	Швидке відновлення можливе за допомогою мультисенсорних систем
Виявлення і пом'якшення	90% успіху відновлення за допомогою мультисенсорного синтезу та систем виявлення на основі машинного навчання.	Ефективні стратегії пом'якшення для відновлення після спуфінгу GPS.

На рис. 1 показано подання у часовій області нормального, підробленого та з перешкодами сигналів GPS. Нормальний сигнал GPS – це чиста синусоїда, яка вказує на стабільний і точний прийом. Навпаки, Фальсифікований сигнал GPS з його невеликим зсувом фази імітує ефект синхронізації часу або атак з ін'єкцією помилкового сигналу, коли приймач обманом змушений прийняти змінений сигнал GPS.

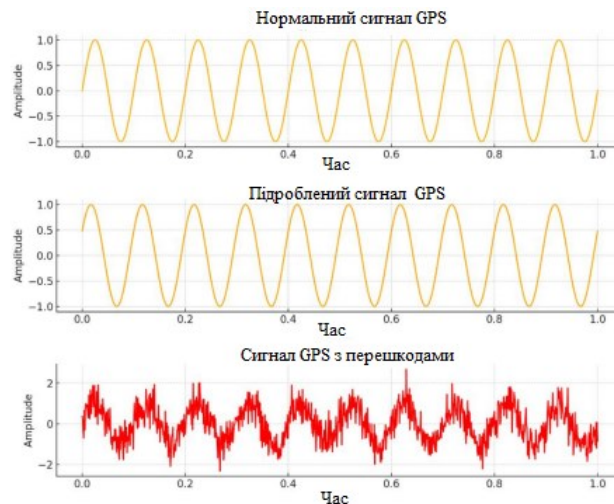


Рис. 1. Відображення у часовій області нормального сигналу GPS, підробленого сигналу GPS, сигналу GPS з перешкодами

Сигнал з перешкодами, наповнений шумом, демонструє як перешкоди порушують діапазон частот, не дозволяючи приймачу зафіксувати дійсний сигнал. Ці результати підтверджують, що підробка GPS викликає незначні зміни сигналу, що призводить до неточного позиціонування, тоді як глушіння створює шум широкого спектру, який повністю порушує сигнал. Дані методи можуть значно знизити ефективність роботи стандартних систем передачі керування, особливо в середовищах із високою щільністю радіоперешкод, що вимагає розробки автономних рішень для забезпечення стабільної орієнтації БПЛА в просторі [9].

Зазначимо, що автономна орієнтація безпілотного літального апарата (БПЛА) – це здатність апарата визначати своє положення та орієнтацію в просторі без залежності від зовнішніх джерел інформації, таких як супутникові навігаційні системи (GPS, ГЛОНАСС) або наземні станції управління. Технологія базується на використанні бортових систем та алгоритмів, які дозволяють: визначати положення у просторі (координати, висота, кутові положення); оцінювати напрямок руху та орієнтацію апарату (азимут, тангаж, крен); коригувати маршрут у реальному часі в умовах невизначеності або впливу перешкод. Основні компоненти автономної орієнтації: інерціальні навігаційні системи (ІНС) включають гіроскопи та акселерометри, які вимірюють кутові швидкості та прискорення; оптичні сенсори: камери або лідари, які аналізують оточення для розпізнавання місцевості та орієнтації щодо об'єктів; магнітометри: використовуються для визначення орієнтації щодо магнітного поля Землі; алгоритми обробки даних: адаптивні фільтри (наприклад, фільтр Калмана) або штучний інтелект забезпечують інтеграцію даних із різних датчиків для підвищення точності орієнтації.

Для забезпечення високої точності та надійності навігації безпілотних літальних апаратів застосовують комплексний підхід, що включає поєднання інерціальних навігаційних систем (ІНС), оптичних сенсорів, магнітометрів та алгоритмів обробки даних на основі штучного інтелекту (ШІ). Це дозволяє забезпечити стійку роботу навіть за умов відсутності супутникових сигналів. ІНС є основою навігаційної системи БПЛА, однак їх використання обмежується зростанням похибки з часом та значною масою приладів. Для вирішення цих проблем застосовують мікроелектромеханічні системи (МЕМС), які дозволяють зменшити розміри та вагу датчиків. Однак, МЕМС-датчики мають високий рівень шуму та дрейфу, що ускладнює точне визначення положення. Для компенсації недоліків МЕМС-датчиків застосовують фільтри оцінки орієнтації, такі як фільтр Маджвіка. Цей фільтр відзначається високою точністю, низькою обчислювальною складністю та стійкістю до шумів, порівняно із сучасними методами

Р. Калмана, що потребують підвищеної складності обчислювального навантаження, збільшення часу процесу навчання та ускладнюють практичну реалізацію із використанням обладнання мікро – та малих БПЛА [10, с. 36-41]. Поєднання комбінованих рішень з технологіями штучного інтелекту дозволяє в реальному часі компенсувати магнітні спотворення та дрейф гіроскопів, що значно зменшує похибки інерціальних датчиків та забезпечує стабільну роботу системи навігації в автономному режимі, навіть за умови відсутності зовнішніх джерел даних [11].

Вирішення проблеми підробки сигналів GPS малих БПЛА потребує використання багатошляхового виявлення, виявлення енергії, відбитки пальців приймача і методи, засновані на машинному навчанні, для виявлення сигналів GPS [12]. Однак ці підходи мають певні ключові проблеми високоточної синхронізації годинника та додаткової апаратної підтримки, схильність неправильно класифікувати звичайні сигнали як підроблені та вразливі до змін навколишнього середовища. Методи, засновані на традиційному машинному навчанні, вибагливі до якості даних і вибору функцій. У порівнянні з традиційними методами машинного навчання, методи глибокого навчання можуть краще фіксувати особливості сигналу та витягувати з нього корисну інформацію, а також обробляти й аналізувати велику кількість даних сигналу GPS за відносно короткий проміжок часу, таким чином виявляючи швидке підроблення сигналу GPS. Прикладом застосування методів глибокого навчання є модель виявлення підробки сигналу GPS на основі PCA-CNN-LSTM, яка в основному складається з трьох частин: аналізу головних компонентів (PCA), згорткової нейронної мережі (CNN) і мережі довгострокової пам'яті (LSTM). Обрані компоненти характеризуються тим, що метод PCA для зниження рівня вхідних даних GPS-сигналу, CNN використовувався для вилучення характеристик даних GPS-сигналу, а роль мережі LSTM полягала в моделюванні виходу CNN як послідовності. В експериментальному середовищі моделювання модель PCA-CNN-LSTM отримала точність 0,9943, точність 0,9798, відкликання 0,965 і F1_Score 0,9722 на наборі даних сигналу GPS. Отже, традиційне машинне навчання зазвичай вимагає ручного вибору та вилучення функцій, тоді як моделі глибокого навчання можуть автоматично навчитися витягувати функції з необроблених даних без ручного проєктування. Моделі глибокого навчання складаються з великої кількості параметрів даних спуфінгу, які дозволяють наскрізне навчання, відображаючи вихідні дані спуфінгу до остаточного виявлення підроблених вихідних даних. Це дозволяє моделям глибокого навчання адаптуватися до складних наборів даних спуфінгу та досягати кращої точності в задачах виявлення фальсифікації.

Особливості автономної орієнтації в умовах радіоелектронної боротьби – це відсутність сигналів GPS, при цьому БПЛА повинен покладатися на інерційні та візуальні дані. Моделювання альтернативних траєкторій на основі геоприв'язки з високою роздільною здатністю (LIDAR, SLAM) забезпечує автономність та стійкість систем керування БПЛА в умовах РЕБ. До переваг геоприв'язки у забезпеченні автономності можна віднести технології створення карт, адже LIDAR забезпечує тривимірне сканування навколишнього середовища з точністю до сантиметрів, SLAM дозволяє одночасно локалізувати БПЛА та будувати карту навіть у відсутності зовнішніх навігаційних сигналів, а висока роздільна здатність геоприв'язки дозволяє враховувати дрібні деталі ландшафту, що критично важливо для обходу перешкод і навігації в умовах активного впливу РЕБ [13]. Слабко пов'язана інтеграція між INS і LiDAR SLAM реалізована за допомогою EKF, що призводить до інтегрованого навігаційного рішення. Як показано на рис. 2, необроблені вимірювання IMU подаються в повну механізацію IMU, яка виробляє положення, швидкість і кути орієнтації інерціальної навігаційної системи.

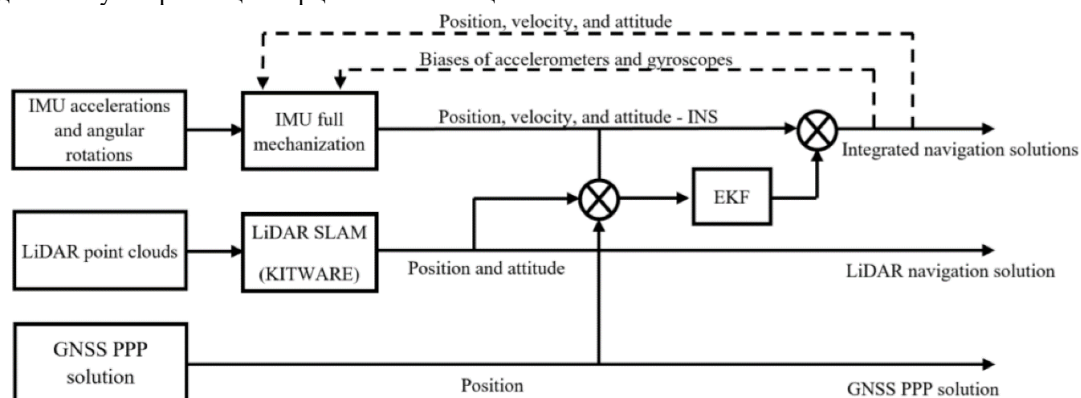


Рис. 2. Блок-схема інтеграції GNSS/INS/LiDAR SLAM LC

Для забезпечення автономної навігації безпілотних літальних апаратів все частіше застосовують системи комп'ютерного зору. Ці системи дозволяють безпілотнику самостійно визначати своє місцеперебування шляхом аналізу змін в оптичному образі земної поверхні, отриманому з бортових камер. Принцип роботи таких систем базується на порівнянні поточного зображення з еталонним, що дозволяє оцінити зміну положення безпілотника в просторі [14;15]. Автономна навігація дрона відбувається в кілька етапів [14]: створення базової карти місцевості за допомогою опорних знімків; визначення контурних точок місцевості; проведення контрольного знімання безпілотним літальним апаратом; порівняння контрольних знімків з опорними; визначення координат та відповідна орієнтація

БПЛА відносно місцевості; коригування схеми маршруту польоту безпілотним літальним апаратом.

Іншим напрямом підвищення стійкості систем передачі керування БПЛА в умовах радіоелектронної боротьби є використання адаптивних антен. Адаптивні антени або адаптивні антенні решітки є різновидом інтелектуальних антен, які мають здатність покращувати якість прийнятого сигналу шляхом збільшення місткості системи, зменшення багатопроменивості та інтерференції між сусідніми каналами. Цифрову обробку сигналу виконує процесор, а сам процес об'єднання сигналів від елементів решітки та зосередження випромінювання у потрібному напрямку називають цифровим формуванням діаграми спрямованості [15]. Система адаптивної антенної решітки динамічно змінює форму діаграми спрямованості, направляючи головний пелюсток на бік потрібного користувача і формуючи нулі діаграми (null-steering) в напрямку джерел перешкод. Відповідно даний вид антен у протидії з РЕБ здійснює придушення перешкод, через формування вузькоспрямованих пелюсток для мінімізації впливу джерел перешкод та через застосування алгоритмів адаптивного формування променя (beamforming). Антена стійка до заглушення сигналу, завдяки використанню частотно-просторової фільтрації для розділення корисних сигналів та перешкод, динамічного переналаштування частотного діапазону [15].

Попри здатність адаптивних антен працювати як з вузькосмуговими, так і з широкосмуговими перешкодами, їх ефективність знижується при великій кількості завад, що надходять з різних напрямків. Діаграма направленості решітки адаптивної антени, а саме кількість і селективність її пелюсток та нулів, визначає її просторові можливості. Недостатня ефективність просторової обробки може бути компенсована за допомогою часової обробки, що дозволяє застосовувати часові або частотні фільтри для придушення вузькосмугових завад. Важливим є те, що за рахунок адаптивної модуляції зменшується ймовірність виявлення сигналу як форми протидії перехопленню сигналу.

Впровадження адаптивних антенних решіток передбачає розвиток інших технологій, включаючи програмне забезпечення, певне радіо, когнітивне радіо, MIMO і багато інших. Наприклад, когнітивне радіо як інтелектуальна радіосистема постійно сканує радіочастотний спектр, виявляючи вільні частотні діапазони. Завдяки цьому воно може динамічно підлаштовуватися під умови радіосередовища, обираючи оптимальну частоту для передачі даних [16]. Такий підхід дозволяє максимально ефективно використовувати радіочастотний ресурс, уникати конфліктів з іншими радіопристроями та забезпечувати стабільний зв'язок навіть у складних умовах. Застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє реалізувати адаптивну систему передачі даних, яка динамічно оптимізує свої параметри відповідно до мінливих умов каналу та рівня завад. Різні типи нейронних мереж можуть бути ефективно використані для вирішення різноманітних завдань у рамках когнітивного радіо: зворотна зв'язна мережа; мережі радіальних базисних функцій; мережі довільних функцій; мережі довгої короткочасної пам'яті (LSTM) [16, с. 231].

Іншим прикладом є застосування системи mMIMO адаптивного формування променя (ABF) – техніки, яка має здатність скасовувати перешкоди. Адаптивне формування променя спрямовує дальнє світло в бажану сторону напрямку, адаптивно усуваючи заважаючи сигнали, шляхом створення нульових значень у небажаних напрямках за допомогою масиву елементів в антені, регулюючи елементи, контролюючи комплексні ваги, доки не буде задана цільова функція зустрічі. Отже, адаптивний алгоритм формування променя автоматично оптимізує структуру масиву. Існує два різних типи адаптивних алгоритмів формування променя: несліпий алгоритм ABF і сліпий алгоритм. Базуючись на вимогах до бездротових мереж нового покоління, які включають точність або відсутність затримки для отримання найвищого SINR для потрібного пристрою, сліпі адаптивні методи більш зручні, ніж несліпі адаптивні методи для масивних систем mMIMO. Останні наукові дослідження пропонують гібридні адаптивні алгоритми формування променя, які поєднують в собі сильні сторони сліпого методу, представленого алгоритмом MVDR, з перевагами несліпого методу і представлений алгоритмом RLS (рис. 3) [17].

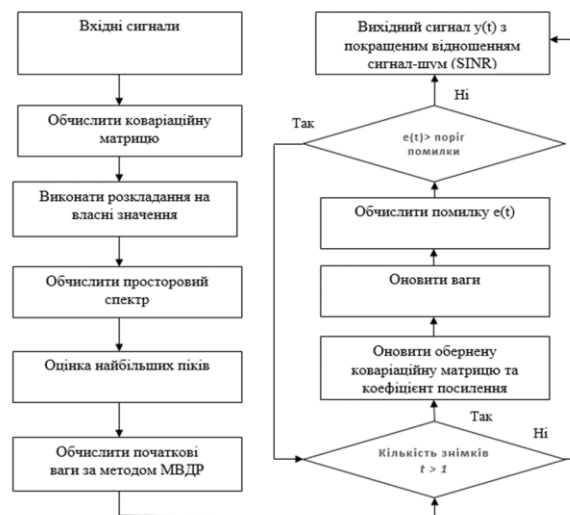


Рис. 3. Блок-схема запропонованого гібридного алгоритму ABF

Стратегії пом'якшення, включаючи криптографічні методи, злиття кількох датчиків, виявлення на основі машинного навчання та антени для захисту від перешкод. Ці стратегії відрізнялися за ефективністю виявлення та запобігання перешкодам. Найбільш часто досліджуваним методом спуфінгу були атаки відтворення, тоді як вузькосмугові та широкосмугові перешкоди були найпоширеніші форми втручання. Машинне навчання та криптографічні методи були одними з найефективніших стратегій пом'якшення цих атак, у деяких дослідженнях ефективність виявлення сягала 90% [9].

Поєднання даних підходів дасть змогу створити адаптивні системи управління, здатні автоматично змінювати свої параметри для протидії різним типам завад. Оцінка ефективності та надійності розроблених методів для систем передачі керування БПЛА може бути проведена за алгоритмом дій:

1. Постановка цілей і завдань: 1.1. Визначення мети, оцінки: перевірка ефективності передачі даних; аналіз стійкості до перешкод; виявлення слабких місць у методах. 1.2. Визначення ключових метрик: затримка передачі сигналу (ms); ймовірність успішної передачі команд (%); пропускна здатність каналу (Mbps); енергоспоживання (W); стійкість до атак РЕБ (імітовані атаки: перешкоджання, підміна сигналу).

2. Підготовка до експериментів. 2.1. Створення моделювального середовища: вибір симулятора (наприклад, MATLAB, NS3, OMNeT++) або фізичну платформу для експериментів. 2.2. Реалізація сценаріїв РЕБ: створити умови для імітації атак: глушіння (Jamming): генерація шумових сигналів; підміна (Spoofing): симуляція підроблених сигналів; перешкоджання (Interference): накладення сигналів. 2.3. Інтеграція системи керування БПЛА: реалізація методів передачі керування; налаштування апаратно-програмних засобів. 2.4. Визначення контрольної групи: задавати порівняльні методи для тестування (наприклад, стандартний протокол зв'язку).

3. Проведення тестувань. 3.1. Тестування в нормальних умовах: моделювання передачі сигналу без зовнішніх перешкод; вимірювання базових показників: затримка, втрати даних тощо. 3.2. Тестування в умовах РЕБ: введення імітованих атак та перешкод. 3.3. Аналіз: змін в затримках, зростання втрат даних, зменшення швидкості передачі. 3.4. Варіювання параметрів: змінювати інтенсивність атак; тестувати різні відстані між БПЛА і оператором. 3.5. Аналіз динамічної адаптації: перевірка, адаптації методів до змін в умовах (автоматична зміна частоти, кодування).

4. Обробка результатів. 4.1. Аналіз даних: побудова графіків залежності ефективності від рівня перешкод; порівняння результатів різних методів. 4.2. Розрахунок надійності: визначення середньої ймовірності збоїв; оцінка відсотків відновлення зв'язку. 4.3. Визначення критичних умов: виявлення рівня інтенсивності атак, за якого система перестає функціонувати.

5. Рекомендації та висновки. 5.1. Оцінка відповідності: чи відповідають результати вимогам. 5.2. Рекомендації з оптимізації: покращення алгоритмів адаптації; впровадження додаткових методів захисту (наприклад, динамічне кодування, перехід на резервні канали). 5.3. Документування: звіт про результати з діаграмами, таблицями й висновками.

Для ефективної оцінки методів передачі керування БПЛА в умовах РЕБ необхідно системно підходити до тестувань, починаючи з постановки цілей, підготовки моделювального середовища та імітації різних сценаріїв атак. Ключовими аспектами є тестування в нормальних і екстремальних умовах, аналіз результатів для визначення слабких місць, а також надання рекомендацій щодо покращення стійкості системи. Такий підхід забезпечить об'єктивну оцінку ефективності та надійності розроблених методів.

Висновки

У статті досліджено стійкість систем передачі керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) в умовах радіоелектронної боротьби (РЕБ) з акцентом на використання комбінованих рішень, що включають автономну орієнтацію та адаптивні антени. Проведений аналіз показав, що такі підходи значно підвищують стійкість систем зв'язку шляхом оптимального використання радіочастотного ресурсу та динамічної адаптації до змін у радіоелектронному середовищі.

Використання автономної орієнтації дозволяє БПЛА оперативніше реагувати на перешкоди шляхом перебудови траєкторії польоту, забезпечуючи мінімізацію втрат зв'язку. Ключові компоненти досягнення повної автономності (навігація, SLAM тощо), вимагають значних зусиль у розробці для забезпечення стабільності системи, ефективного планування траєкторії та оптимізації енергії. Керування великими потоками даних у реальному часі, пов'язаними з автономними операціями БПЛА, потребує інтеграції передових методів штучного інтелекту (ШІ), таких як машинне навчання, еволюційні алгоритми та експертні системи з нечіткою логікою. Застосування адаптивних антен сприяє підвищенню енергетичної ефективності та фокусуванню радіосигналу в умовах активних перешкод. Таким чином, інтеграція автономної орієнтації та адаптивних антен є перспективним напрямом для розробки стійких систем керування БПЛА. Подальші дослідження мають бути зосереджені на оптимізації алгоритмів адаптації та зменшенні затримок у роботі систем передачі даних, впровадженні компактних і недорогих сенсорних пристроїв, включаючи LiDAR, інфрачервоні, теплові камери, спеціалізовані камери, багатоспектральне зображення тощо. Реалізація розглянутих методів сприяє підвищенню надійності та ефективності систем керування БПЛА, що дозволяє розширити сферу їх застосування, від екологічного моніторингу до проведення спеціальних операцій.

Література

1. Гладкий С. О. Розвиток радіоелектронної боротьби в умовах війни із застосуванням дронів [Електронний ресурс] / С. О. Гладкий. – Режим доступу: <https://surl.li/eijsay>.
2. Нечипоренко В. А. Методи керування БПЛА із застосуванням комп'ютерного зору / В. А. Нечипоренко // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2024. – Т. 35 (74), № 5. – С. 217–225. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/32>.
3. Семендяй С. Підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах застосування засобів радіоелектронної боротьби / С. Семендяй // Технічні науки та технології. – 2023. – № 2(32). – С. 224–234. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-224-234](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-224-234).
4. Марченко А. О., Войтко В. В., Кузьменко В. В. Рекомендації щодо розвитку антенних систем засобів радіорелейного зв'язку // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2023. – № 2(47). – С. 119–124. DOI: [10.33099/2311-7249/2023-47-2-119-124](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-119-124).
5. Chamola V., Kotes P., Agarwal A., Naren, Gupta N., Guizani M. Comprehensive review of unmanned aerial vehicle attacks and neutralization techniques // Ad Hoc Networks. – 2021. – Vol. 111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>.
6. Лежньов Д., Рибаків К. Інтеграція методів автономної орієнтації в системи управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА) в умовах придушення радіосигналу та відеозв'язку // Вісник Хмельницького національного університету. – 2024. – № 2 (333). – С. 446–452. DOI: [10.31891/2307-5732-2024-333-2-70](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-333-2-70).
7. Oprisky I., Bybyk R. Research on modern methods of electronic warfare (EW) and methods and means of its counteraction Ukrainian // Scientific Journal of Information Security. – 2023. – Vol. 29, Issue 2. – P. 88–97. DOI: [10.18372/2225-5036.29.17873](https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17873).
8. Бибик Р. Т., Наконечний Ю. М. Дослідження впливу електромагнітних перешкод на функціонування систем зв'язку та радіолокації // Комп'ютерні системи та мережі. – 2024. – № 1 (Вип. 6). – С. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.23939/csn2024.01.001>.
9. Joeaneke R. C., Chimmy P. Protecting autonomous UAVs from GPS spoofing and jamming: A comparative analysis of detection and mitigation techniques // Journal of Engineering Research and Reports. – 2024. – № 26. – P. 71–92. DOI: <https://doi.org/10.9734/jerr/2024/v26i101291>.
10. Фесенко О. Д., Беяков Р. О., Гулій В. С. Імітаційне моделювання безплатформної інерціальної навігаційної системи БПЛА на основі неймережових алгоритмів [Електронний ресурс] // Г7 Сили територіальної оборони ЗСУ. – Режим доступу: <https://surl.li/wjplzk>.
11. Фесенко О. Д. Вдосконалений метод орієнтації безпілотного літального апарата в тривимірному просторі за допомогою мікроелектромеханічних систем інерціальної системи навігації на основі фільтра Маджвіка // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки. – 2018. – № 3 (Т. 29 (68)). – С. 35–42.
12. Sun Y., Yu M., Wang L., Li T., Dong M. A deep-learning-based GPS signal spoofing detection method for small UAVs // Drones. – 2023. – Vol. 7(6). – P. 370. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7060370>.
13. Elamin A. A., Abdelaziz N., El-Rabbany A. GNSS/INS/LiDAR integration scheme for UAV-based navigation in GNSS-challenging environments // Sensors. – 2022. – Vol. 22(24). – P. 9908. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22249908>.
14. Волков О. Є., Комар М. М., Волошенюк Д. О., Господарчук О. Ю. Інтелектуальна інформаційна технологія автономної навігації безпілотного літального апарату [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/e6e0e8aa-4ed5-4d4b-b80c-160a6bbc6eb9/content>.
15. Кадицьникова Т. М., Савчук І. В., Некрасов В. Є. Алгоритм автономного позиціонування безпілотного літального апарату // Математичне моделювання. – 2024. – № 1(50). – С. 112–120. DOI: [10.31319/2519-8106.1\(50\)2024.305498](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(50)2024.305498).
16. Якорнов Є. А., Авдєєнко Г. Л., Кулик О. В. Модель цифрової системи часового та просторового придушення завад для GPS приймачів [Електронний ресурс] // Проблеми телекомунікацій ПТ-2017. – Київ, 2017. – С. 33–35. – Режим доступу: <https://surl.li/bssjrn>.
17. Manai H., Ben Hadj Slama L., Bouallegue R. A hybrid adaptive beamforming algorithm for SINR enhancement in massive MIMO systems // Radioengineering. – 2023. – Vol. 32, № 3. – P. 345–355. DOI: [10.13164/re.2023.0345](https://doi.org/10.13164/re.2023.0345).

References

1. Hladkyi S. O. Rozvytok radioelektronnoi borotby v umovakh viiny iz zastosuvanniam droniv [Elektronnyi resurs] / S. O. Hladkyi. – Rezhym dostupu: <https://surl.li/eijsay>.
2. Nechiporenko V. A. Metody keruvannia BPLA iz zastosuvanniam kompiuternoho zoru / V. A. Nechiporenko // Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky. – 2024. – T. 35 (74), № 5. – S. 217–225. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/32>.
3. Semendiai S. Pidvyshchennia efektyvnosti bezprovodovykh system peredachi danykh v umovakh zastosuvannia zasobiv radioelektronnoi borotby / S. Semendiai // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. – 2023. – № 2(32). – S. 224–234. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-224-234](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-224-234).

4. Marchenko A. O., Voitko V. V., Kuzmenko V. V. Rekomendatsii shchodo rozvytku antenykh system zasobiv radioreleinoho zviazku // Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony. – 2023. – № 2(47). – S. 119–124. DOI: 10.33099/2311-7249/2023-47-2-119-124.
5. Chamola V., Kotes P., Agarwal A., Naren, Gupta N., Guizani M. Comprehensive review of unmanned aerial vehicle attacks and neutralization techniques // Ad Hoc Networks. – 2021. – Vol. 111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>.
6. Lezhnov D., Rybakov K. Intehratsiia metodiv avtonomnoi oriantatsii v systemy upravlinnia bezpilotnykh litalnykh aparatamy (BPLA) v umovakh prydushennia radiosyhnalu ta videozviazku // Herald Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2024. – № 2 (333). – S. 446–452. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-333-2-70.
7. Opirskyy I., Bybyk R. Research on modern methods of electronic warfare (EW) and methods and means of its counteraction Ukrainian // Scientific Journal of Information Security. – 2023. – Vol. 29, Issue 2. – P. 88–97. DOI: 10.18372/2225-5036.29.17873.
8. Bybyk R. T., Nakonechnyi Yu. M. Doslidzhennia vplyvu elektromagnitnykh pereshkod na funktsionuvannia system zviazku ta radiolokatsii // Kompiuterni systemy ta merezhi. – 2024. – № 1 (Vyp. 6). – S. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.23939/csn2024.01.001>.
9. Joaneke R. C., Chimmy P. Protecting autonomous UAVs from GPS spoofing and jamming: A comparative analysis of detection and mitigation techniques // Journal of Engineering Research and Reports. – 2024. – № 26. – P. 71–92. DOI: <https://doi.org/10.9734/jerr/2024/v26i101291>.
10. Fesenko O. D., Bieliakov R. O., Hulii V. S. Imitatsiine modeliuвання bezplatformnoi inertsiialnoi navihatsiinoi systemy BPLA na osnovi neiromerezhevykh alhorytmiv [Elektronnyi resurs] // G7 Syly terytorialnoi oborony ZSU. – Rezhym dostupu: <https://surl.li/wjplzk>.
11. Fesenko O. D. Vdoskonalenyi metod oriantatsii bezpilotnoho litalnoho aparata v tryvymirnomu prostori za dopomohoiu mikroelektromekhanichnykh system inertsiialnoi systemy navihatsii na osnovi filtra Madzhvika // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Tekhnichni nauky. – 2018. – № 3 (T. 29 (68)). – S. 35–42.
12. Sun Y., Yu M., Wang L., Li T., Dong M. A deep-learning-based GPS signal spoofing detection method for small UAVs // Drones. – 2023. – Vol. 7(6). – P. 370. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7060370>.
13. Elamin A. A., Abdelaziz N., El-Rabbany A. GNSS/INS/LiDAR integration scheme for UAV-based navigation in GNSS-challenging environments // Sensors. – 2022. – Vol. 22(24). – P. 9908. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22249908>.
14. Volkov O. Ye., Komar M. M., Volosheniuk D. O., Hospodarchuk O. Yu. Intelktualna informatsiina tekhnolohiia avtonomnoi navihatsii bezpilotnoho litalnoho aparatu [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/e6e0e8aa-4ed5-4d4b-b80c-160a6bbc6eb9/content>.
15. Kadylnykova T. M., Savchuk I. V., Nekrasov V. Ye. Alhorytm avtonomnoho pozytsionuvannia bezpilotnoho litalnoho aparatu // Matematychni modeliuвання. – 2024. – № 1(50). – S. 112–120. DOI: 10.31319/2519-8106.1(50)2024.305498.
16. Yakornov Ye. A., Avdieienko H. L., Kulyk O. V. Model tsyfrovoy systemy chasovoho ta prostorovoho prydushennia zavada dlia GPS prymachiv [Elektronnyi resurs] // Problemy telekomunikatsii PT-2017. – Kyiv, 2017. – S. 33–35. – Rezhym dostupu: <https://surl.li/bssjrn>.
17. Manai H., Ben Hadj Slama L., Bouallegue R. A hybrid adaptive beamforming algorithm for SINR enhancement in massive MIMO systems // Radioengineering. – 2023. – Vol. 32, № 3. – P. 345–355. DOI: 10.13164/re.2023.0345.