

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-16>

УДК 621.396

САЛІЙ Олександр

Національний технічний університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0002-7021-5288>

e-mail: os.telcom2024@gmail.com

ВОЙТЕНКО Сергій

Державний науково-дослідний інститут авіації

<https://orcid.org/0000-0002-5341-7200>

e-mail: serhii.voitenko@npp.nau.edu.ua

ТАРАНЕНКО Віктор

Державний науково-дослідний інститут авіації

<https://orcid.org/0000-0003-1758-8018>

БОЙКО Юлій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

e-mail: boiko_julius@ukr.net

ДРУЖИНІН Володимир

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

e-mail: v_druzhinin@ukr.net

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЛЬОТУ ЗГРАЇ БПЛА В УМОВАХ ЗАВАД ТА ДІЇ АНТИДРОНОВИХ СИСТЕМ ВОРОГА

У статті розглядається актуальне завдання застосування ударних FPV-дронів в режимі «камікадзе» для знищення ворожих антидронових систем (C-UAS), систем окопного радіоелектронного придушення (ОРЕБ) та блокування логістичних шляхів противника на відстані до 50 км. Запропоновано комплексний підхід, що включає алгоритм польоту з інтеграцією різних методів захисту БПЛА від впливу ОРЕБ, C-UAS, тактичних зенітно-ракетних комплексів та радіолокаційних систем ворога. Основна увага приділена розробці інтелектуальних систем (IS) для забезпечення польоту на малих висотах (1–20 м) з обходом перешкод, підвищенням стійкості до радіоелектронних завад та досягненням високої точності ураження цілей (+0,2 м). У роботі синтезовано підхід до оптимізації польотних параметрів у реальному часі, зокрема: забезпечення прямої видимості, якісного радіоканалу FPV, частотної оптимізації та стабілізації польоту. Розроблені рішення базуються на інноваційних можливостях БПЛА, таких як аналіз радіозавад, візуальна одометрія та стабілізація польоту, що забезпечує ефективне виконання польотної місії в умовах активного радіоелектронного впливу.

Ключові слова: data-link, мікро-БПЛА, FPV, безпілотна авіаційна система, інтелектуальна система, оптимізація параметрів польотної місії, система протидії БПЛА, завадозахищеність, активні загороджувальні завади, політ в режимі «крилатої ракети», адаптація.

SALIY Oleksandr

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

VOYTENKO Sergii, TARANENKO Victor

State Research Institute of Aviation

BOIKO Juliy

Khmelnytskyi National University

DRUZHYNIN Volodymir

Taras Shevchenko National University of Kyiv

INTELLIGENT SYSTEM FOR ENSURING UAV SWARM FLIGHT UNDER JAMMING AND THE IMPACT OF ENEMY COUNTER-DRONE SYSTEMS

This article addresses the critical and timely task of employing strike FPV drones in kamikaze mode to neutralize enemy counter-unmanned aerial systems (C-UAS), trench-based electronic warfare systems (EWS), and disrupt enemy logistics within a tactical range of 1 to 50 kilometers. Given the increasing sophistication of adversarial countermeasures, such as jamming and interception systems, this study emphasizes the need for a robust and adaptive approach to ensure the operational effectiveness of kamikaze drones in highly contested environments. The study proposes a comprehensive algorithm for UAV flight operations that integrates multiple protection strategies against various threats, including C-UAS systems, EWS, tactical missile systems (TMS), and advanced radar systems. The flight mode mimics that of a cruise missile, maintaining low-altitude trajectories (1–20 meters) to evade detection and mitigate the effects of enemy countermeasures. The low-altitude profile also enables obstacle avoidance, critical for terrain navigation in complex battlefield conditions.

A key contribution of this work is the development of a novel approach to utilizing intelligent systems (IS) to maximize the operational range of FPV kamikaze drones. These systems are designed to function effectively under adversarial jamming conditions, the absence of satellite navigation, and the inherent limitations of inertial navigation systems. The proposed methodology ensures high mission accuracy, achieving target precision within +0.2 meters, even at ultra-low altitudes of 0.5 to 2 meters.

To achieve these results, the paper introduces an integrated IS-based optimization framework that evaluates and adjusts flight parameters in real time. The optimization criteria include maintaining an uninterrupted line-of-sight for signals, ensuring high-quality data transmission with minimal delay, enhancing resistance to electronic jamming, selecting optimal frequency bands (7 GHz to 38 GHz), and stabilizing UAV flight dynamics. Advanced on-board capabilities such as real-time wave propagation analysis, electronic countermeasure assessment, visual odometry, obstacle avoidance, and horizontal flight stabilization form the backbone of the proposed approach. These innovations collectively enable the drones to execute their missions with maximum efficiency, even in highly adverse conditions. The study also outlines key technical requirements for next-generation unmanned aerial systems (UAS) to enhance their resilience and operational efficiency, paving the way for further advancements in drone-based tactical operations.

Keywords: data-link, micro-UAV, FPV, Unmanned Aerial System (UAS), Intelligent System (IS), optimization of flight mission parameters, C-UAS (Counter-Unmanned Aerial System), jamming resistance, active electronic countermeasures, flight in "cruise missile" mode, adaptation

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Станом на даний час ворог (російська федерація) активно застосовує "окопний РЕБ" (ОРЕБ), який діє в діапазоні частот від 0,3 ГГц до 6 ГГц [1] та захищає свої логістичні шляхи підвозу бойових та матеріально-технічних засобів від безпілотних літальних апаратів (БпЛА) Збройних Сил України (ЗСУ), які діють в режимі польоту "від першої особи" (First Person View, FPV) в якості дронів - "камікадзе" (ударних дронів, з польотною місією в один кінець). В зв'язку з цим використання "цивільних" БпЛА-FPV ЗСУ (в трактовці класифікації НАТО це системи LSS-UAV (Low, Slow and Small UAV), тобто LSS-UAV – БпЛА, які літають низько, повільно та малі за розмірами [2]), як ударних (прийомо-передавачі яких діють в діапазоні частот 0,3...5,8 ГГц), значно знівельовано засобами ОРЕБ ворога. Тому в перспективі, в умовах активного застосування ворогом ОРЕБ, С-UAS, ТЗРК, ОРЛС, актуальною задачею є підвищення рівня захисту LSS-UAV-FPV ЗСУ від даних систем. В зв'язку з цим, для досягнення вищезазначених цілей (підвищення захисту LSS-UAV-FPV ЗСУ від ОРЕБ, С-UAS, ТЗРК, ОРЛС), необхідно:

- розробити алгоритм польоту з використанням комплексування (одночасного застосування) різноманітних методів захисту БпЛА від різних ворожих систем (від ОРЕБ, С-UAS, ТЗРК, ОРЛС) і при цьому застосувати нові інноваційні принципи ситуативного адаптивного алгоритму керування польотом LSS-UAV-FPV в якості "камікадзе-крилата ракета (ККР)" для забезпечення гарантованої максимальної дальності польоту LSS-UAV-FPV ($d_{0\max}$), який би успішно діяв в сантиметровому діапазоні частот від 7ГГц до 38ГГц та був робастним (стійким) до ОРЕБ ворога;

- на основі розробленого алгоритму польоту розробити комплексний підхід застосування елементів інтелектуальних систем (IS) для забезпечення максимальної дальності польоту БпЛА-FPV в режимі ККР (крилатої ракети) в умовах активних загороджувальних завад ворога, відсутності (радіоподавленні) глобальної системи супутникової навігації та в умовах неточної (некоректної роботи з великою похибкою) інерціальної системи навігації з подальшим обґрунтуванням та розробкою вимог до елементів безпілотної авіаційної системи (UAS).

При цьому, гарантована максимальна дальність польоту LSS-UAV-FPV ($d_{0\max}$) залежить від [1-4]: розробленої пілотом польотної місії (польотної карти), польотної карти висот, умов розповсюдження радіохвиль та ситуаційної обізнаності в реальному часі стосовно умов розповсюдження радіохвиль в заданому діапазоні частот та від застосування ворогом активних загороджувальних завад в зоні планованих бойових дій (ЗПБД) UAV. Даний синтезований комплексний підхід застосування елементів IS повинен забезпечити (підготувати) та передбачити використання початкових даних для нейронних мереж в аспекті бази інформаційної обізнаності стосовно умов розповсюдження радіохвиль та умов РЕБ ворога, як елемент першого рівня нейронної мережі IS для автономного керування польотом LSS-UAV-FPV, за умови відсутності глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС) та інерціальної навігаційної системи (ІНС) [5, 6].

На сучасному етапі застосування БпЛА ЗСУ, які діють в режимі польоту "від першої особи" FPV, в якості дронів - "камікадзе" (ударних дронів, з польотною місією в один кінець), актуальна задача знищення ворожих антидронових систем (Counter Unmanned Aerial System C-UAS), систем "окопного РЕБу" та блокування логістичних шляхів ворога на глибину його бойових порядків від 1 км до 50 км. При цьому необхідно гарантовано реалізувати політ БпЛА-FPV в режимі "камікадзе" з функцією "крилатої ракети" (політ відбувається на мінімальних висотах 1м...20 м над поверхнею Землі з огинанням об'єктних перешкод), що в свою чергу мінімізує вплив ворожого "окопного РЕБ" (ОРЕБ), суттєво підвищує захист від окопних радіолокаційних станцій (ОРЛС), тактичних зенітно-ракетних комплексів (ТЗРК) та різноманітних сучасних антидронових систем С-UAS ворога, основною ціллю яких є фізичне знищення зграї міні-БпЛА та мікро-БпЛА ЗСУ тактичного рівня.

Тому головною метою статті є:

- розробка алгоритму польоту з використанням комплексування (одночасного застосування) різноманітних методів захисту БпЛА від різних ворожих систем (від ОРЕБ, С-UAS, ТЗРК, ОРЛС);
- на основі розробленого алгоритму польоту розробити комплексний підхід застосування елементів

IS для забезпечення максимальної дальності польоту БпЛА-FPV в режимі “камікадзе - крилата ракета” в умовах активних загороджувальних завад ворога, відсутності (радіоподавлення) глобальної системи супутникової навігації та в умовах неточної (некоректної роботи з великою похибкою) інерціальної системи навігації з подальшим обґрунтуванням та розробкою вимог до елементів UAS.

Основними результатами статті є синтез (розробка) комплексного підходу застосування елементів IS для забезпечення польотної місії БпЛА-FPV в режимі “камікадзе - крилата ракета” (на висотах польоту 1...20 м) на максимально можливу відстань, на основі комплексного критерія (“забезпечення прямої видимості” + “забезпечення відкритої радіолінії передачі даних” + “оптимізація завадостійкості” + “оптимізація завадозахищеності” + “якісний радіоканал FPV відеоданих з мінімальною затримкою в часі” + “оптимізація частотного діапазону для зграї дронів в діапазоні частот сантиметрових радіохвиль 7 ГГц...38 ГГц” + “оптимізація швидкості польоту” + “оптимізація кількості БпЛА у складі зграї дронів”), що діє в реальному часі, із забезпеченням точності враження цілі до +0,2 м на висотах 0,5...2 м з використанням першого рівня аналізу ситуаційної обізнаності заводової обстановки в зоні бойових дій зграї БпЛА, який базується на специфічних інноваційних можливостях БпЛА-FPV:

- вбудованій інтегральній системі аналізу розповсюдження радіохвиль в режимі реального часу (on-line) з функцією оптимізації, як перший рівень ситуаційної обізнаності нейронної мережі інтелектуальної системи БпЛА-FPV у складі прийомо-передавача БпЛА-FPV;
- вбудованій інтегральній системі аналізу заводової обстановки від впливу ОРЕБ (активних радіозавад ворога) на борту БпЛА в режимі on-line з функцією оптимізації, як перший рівень ситуаційної обізнаності нейронної мережі інтелектуальної системи БпЛА-FPV у складі прийомо-передавача мікро-БпЛА-FPV;
- вбудованій системі візуальної одометрії у складі мікро-БпЛА;
- вбудованій системі огинання об'єктних перешкод на мінімально можливих висотах польотної місії мікро-БпЛА у складі мікро-БпЛА;
- вбудованій системі стабілізації польоту UAV в горизонтальній площині і яка входить до складу мікро-БпЛА.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Проведена розширена вибірка (з інтернет ресурсів у вільному доступі) та деталізований аналіз робіт, з яких в публікаціях [1, 7–11] максимально наближено висвітлюється вищезазначена проблематика та регламентуються відповідні аспекти та вимоги при реалізації польотної місії БпЛА-FPV в умовах активного застосування ворогом ОРЕБ, С-UAS, ТЗРК, ОРЛС.

Однак, аналіз вище зазначених публікацій засвідчує відсутність деталізованого синтезу (розробки) комплексного підходу застосування елементів інтелектуальних систем (IS) для забезпечення максимальної дальності польоту БпЛА-FPV в режимі ККР в умовах активних загороджувальних завад ворога, відсутності (радіоподавлення) глобальної системи супутникової навігації та в умовах неточної (некоректної роботи з великою похибкою) інерціальної системи навігації з подальшим обґрунтуванням та розробкою вимог до елементів UAS. Також у вищезазначених роботах відсутня деталізація режиму ККР, що є багатокритеріальною задачею оптимізації параметрів польотної місії зграї мікро-UAV та LSS-UAV-FPV в умовах радіоконфлікту та активної дії С-UAS, ОРЕБ, ТЗРК, ОРЛС з урахуванням антагоністичної теорії гри.

Аналіз сучасних, як правило, цивільних БпЛА (надалі - LSS-UAV-FPV), які при організації польотної місії використовують режим FPV та масово застосовуються для виконання бойових завдань в зоні активних бойових дій, засвідчує, що вони не здатні протистояти С-UAV, ОРЕБ, ТЗРК, ОРЛС [12-14]. Тому необхідно розробити нові підходи стосовно комплексування різних методів протидії з використання елементів IS.

Таким чином, на підставі аналізу предметної області дослідження можна сформулювати наступні початкові дані:

- кліматичні умови в заданій зоні планованих бойових дій UAV (ЗПБД) змінюється в реальному часі кожні 10 хвилин та наявна велика невизначеність параметрів земної тропосфери: вологість, можливий дощ чи туман, хмарність, застосування аерозолей ворогом на трасі польоту - невизначена на всій трасі польоту;
- характер рослинності на трасі польоту не визначений (тип дерев, листя, хвоя, товщина лісопосадок, та інше), отже наявна велика дисперсія відхилень від номінальних значень: висота дерев, їх вид та величина листя);
- характер наявності будівель на трасі польоту - невизначений;
- характер вітрових турбулентностей - невизначеність;
- швидкість вітру без поривів - величина невідома, але менша ніж 20 м за секунду;
- розглядається найгірший випадок, а саме: ворог в ЗПБД застосовує постійно діючу загороджувальну заваду в діапазоні частот 0,3ГГц - 6ГГц, при цьому типи загороджувальних завад можуть бути різноманітні та створюють купол (напівсферу), з радіусом впливу до 3000м, над певними ділянками в критичних точкових місцях розташування особового складу ворога та його техніки [15];

- для виявлення БпЛА ЗСУ ворог застосовує окопну РЛС у складі С-UAS, яка працює в діапазоні частот до 18 ГГц [1]; мертва зона сканування простору даної РЛС - висота менше ніж 10 м при відстані до UAV менше ніж 1000м;

- засобами розвідки ЗСУ за допомогою БпЛА розвідників до початка польотної місії зграї БпЛА ЗСУ виявлено:

1) що на контрольованій ділянці логістичній дорозі виявлений поодинокий транспортний засіб або колона бойової техніки, який засобами елементу штучного інтелекту (ШІ) типу “машинний зір”, ідентифікована, як ціль, яка повинна бути знищена негайно. Даний транспортний засіб рухається з відповідною швидкістю;

2) в окремих замаскованих точках, з відомими координатами, в глибині розташування противника 1...50 км від лінії бойового зіткнення виявлені відповідні цілі, які ідентифіковані як різновиди С-UAS, ОРЕБ, ТЗРК, ОРЛС, та які негайно необхідно вразити або знищити;

3) визначена ділянка дороги, яка повинна блокуватися за допомогою БпЛА-FPV в реальному часі, щоб вразити вищезазначену ціль з допомогою зграї БпЛА, тобто відома приблизна відстань до цілі - d_0 (км), тобто відстань до проміжку дороги, яку необхідно блокувати;

- при прогнозуванні на найгірший випадок приймаємо випадок, коли портативними засобами ОРЕБу ворожі транспортні засоби та бойова техніка захищена “напівкуолом радіозавад” з радіусом дії 3000м в діапазоні частот 0,3...6 ГГц.

Отже, цільова функція (критерій оптимізації) на дослідження наступний: з урахуванням вищезазначених умов початкових даних, по факту отримання даної розвідувальної інформації, засобами IS на основі баз даних нейронної мережі, розробити алгоритм польоту КРР, вимоги до прийомо-передавача БпЛА, які необхідно застосувати у складі рою, та знищити ворожі цілі в реальному часі за допомогою використання роїв БпЛА-FPV, які розташовані на глибину від 1 км до 50 км від лінії бойового зіткнення (ЛБЗ).

Таким чином мета представленої роботи зосереджена на наступних питаннях:

- розробити алгоритму польоту з використанням комплексування (одночасного застосування) різноманітних методів захисту БпЛА від різних ворожих систем (від ОРЕБ, С-UAS, ТЗРК, ОРЛС), при цьому застосувати нові інноваційні принципи ситуативного адаптивного алгоритму керування польотом LSS-UAV-FPV в якості “камікадзе-крилата ракета (ККР)” для забезпечення гарантованої максимальної дальності польоту LSS-UAV-FPV (d_{0max}), який би успішно діяв при використанні радіолінії передачі даних (data-link) між станцією наземного керування (СНК) та LSS-UAV-FPV в сантиметровому діапазоні частот від 7ГГц до 38ГГц та був робастним (стійким) до ОРЕБ ворога;

- на основі розробленого алгоритму польоту розробити комплексних підхід застосування елементів IS для забезпечення максимальної дальності польоту БпЛА-FPV в режимі ККР в умовах активних загороджувальних завад ворога, відсутності (радіоподавленні) глобальної системи супутникової навігації та в умовах неточної (некоректної роботи з великою похибкою) інерціальної системи навігації з подальшим обґрунтуванням та розробкою вимог до елементів UAS.

Отримати кінцевий результат оптимізації при застосуванні елементів IS та забезпечити успішний політ рою БпЛА-FPV для виконання бойового завдання з враженням цілі в режимі КРР (на висотах польоту 1м...20м над поверхнею Землі з оминанням об’єктних перешкод), із забезпеченням критерія “відкритості радіолінії”. Результат досягається з метою досягнення точності враження ворожої цілі до +0,2 м, що рухається по логістичній дорозі або знаходиться на стаціонарній позиції, з використанням першого рівня елементів IS, який базується на специфічних інноваційних можливостях прийомо-передавача БпЛА-FPV, з цільовою функцією - максимізація дальності польоту, в умовах застосування ворогом ОРЕБу в діапазоні частот від 0,3 ГГц до 6 ГГц, відсутності (придушенні) каналів глобальної супутникової навігації та активного застосування ворожих систем С-UAS, ТЗРК, ОРЛС.

Розробка алгоритму польоту БпЛА

Проведемо розробку алгоритму польоту з використанням комплексування (одночасного застосування) різноманітних методів захисту БпЛА від різних ворожих систем (від ОРЕБ, С-UAS, ТЗРК, ОРЛС). Розглянемо обґрунтування ситуаційної схеми зв’язку.

Для забезпечення польотної місії БпЛА на максимально-можливу дальність d_0 [км] необхідно одночасно забезпечити умову “прямої видимості” (LoS) та вимогу “відкритості” радіолінії (data-link) між станцією наземного керування (СНК) та БпЛА (де data-link - цифрова радіолінія зв’язку між БпЛА та СНК).

Випадок забезпечення критерія “відкритості” data-link стосовно польотної місії БпЛА-FPV в режимі камікадзе представлений на ситуаційній схемі організації польоту LSS-UAV-FPV в режимі КРР (рис. 1).

Розглянемо зміст поняття “прямої видимості” (LoS - Line of sight). Актуальність даного критерія - поняття “прямої видимості” LoS визначено в [16-21]. Основний зміст: “В. Терміни, пов’язані з впливом Землі на поширення радіохвилі. В2. Line of sight propagation (LOS-propagation) - поширення радіохвиль між

двома точками, для яких прямий промінь достатньо вільний від перешкод, щоб дифракція мала незначний ефект». В даному визначенні LoS використано наступні поняття: “прямий промінь”, “достатньо вільний” та “незначний ефект”, що зводить дане визначення до певної невизначеності самого поняття LoS при розрахунку енергетичного потенціалу радіолінії сантиметрового діапазону частот. Тобто дифракційні затухання радіохвиль за рахунок перешкод визначені за умови LoS як “незначні”, що не забезпечує якісної оцінки рівня затухання при виконанні польотної місії БПЛА в режимі on-line (реально часу). При цьому, поняття “достатньо вільний від перешкод” має невизначеність, що значно ускладнює розрахунки рівня радіосигналу на вході радіоприймача БПЛА-FPV при розповсюдженні радіохвиль сантиметрового діапазону, а особливо критично - при оцінці рівня радіосигналу під час польоту БПЛА в реальному часі при виконанні конкретної польотної місії на задану відстань.

Також не визначено поняття “перешкоди”, як об’єкт із заданою електропровідністю (що детально обґрунтовано згідно академічної теорії дифракції розповсюдження електромагнітних радіохвиль, розробником якої є V.A. Fock [22], яка вносить додаткові затухання при розповсюдженні радіохвиль, які залежать від діапазону частот, та суттєво проявляються коли частота розповсюдження радіо хвиль менша ніж 3 ГГц). Також при визначенні критерія LoS, в даному випадку, не врахована академічна теорія розповсюдження Земних радіохвиль, яка описана в роботі Фейнберга [23].

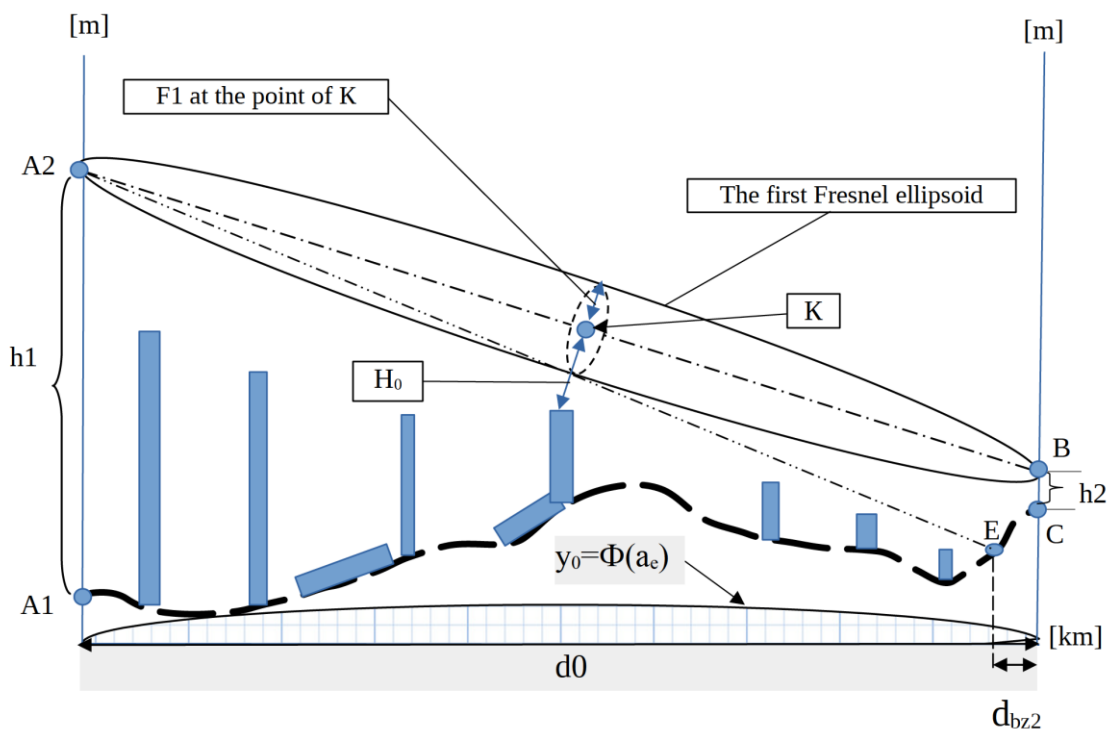


Рис.1. Ситуаційна схема організації польоту LSS-UAV-FPV в режимі KPP: - об’єктні перешкоди різного типу: 1) ліс ; 2) лісосмуга; 3) лісопосадка; 4) будівлі різного призначення (надалі висота i - об’єктної перешкоди — h_{pi}); - поверхня Землі (рел’єф) у вертикальній площині

На рис. 1 використано наступні позначення: H_0 - мінімальний просвіт на трасі прямої видимості (LoS) між перешкодою та геометричною лінією, між точкою A2 та B; K- точка мінімального просвіту на трасі між БПЛА-ретранслятором та БПЛА-FPV; $y_0 = \Phi(a_e)$ - умовний, нульовий рівень (рівень океану) Землі, як функція від ефективного радіуса Землі a_e ([18], параметр C15), який залежить від характеру рефракції в інтервалі часового терміну польотної місії для даного району; A1 — ситуаційне місце знаходження фазового центру антени СНК на висоті підвісу $h_0=1..2$ м від поверхні Землі; A2 — ситуаційне місце знаходження фазового центру антени БПЛА-ретранслятора (надалі UAV-R) на висоті підвісу $h_1=20..2500$ м від поверхні Землі; B - ситуаційне місце знаходження фазового центру антени БПЛА-FPV (в режимі KKP) на висоті підвісу h_2 від поверхні Землі; $h_2=1...3$ м; C - ситуаційне місце знаходження цілі на поверхні Землі, яку необхідно знищити за допомогою БПЛА-FPV в режимі KKP; F_1 - радіус першої зони Френеля [м], який визначається за формулою [16]:

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}} \quad (1)$$

Де згідно формули (1) f – частота радіохвилі в [ГГц]; $d_1 = |A_2; K|$ – відстань (довжина) в [км]; $d_2 = |KB|$ – відстань (довжина) в [км]; $d = |A_2; B|$ – відстань (довжина) польотної місії БПЛА-FPV в [км]; відстань траєкторії прямої видимості LoS; d_0 – відстань (довжина) до цілі від СНК до точки С в [км]; d_{bz2} – “ближня зона” в [км]; зона біля С в напрямку на UAV-R, в якій перша зона Френеля вільна від перешкод. Дана зона забезпечується: 1) вибором точки С на рельєфі (поверхні Землі) — для блокування ділянки дороги, яка йде по схилу чи на пагорбі; 2) висотою підвісу фазового центру антени UAV-R h_1 ; 3) перепадом висот поверхні Землі в даній зоні d_{bz2} ; 4) відсутністю відображеного радіосигналу від поверні Землі в напрямку від А2 до В; a_e — нульовий рівень (рівень океану) ефективного радіусу Землі, який залежить від характеру рефракції в інтервалі часового терміну польотної місії для даного району [17].

На рис. 1 представлена типова ситуаційна схема при умові забезпечення “прямої видимості” (LoS) та “відкритості радіоінтервалу” між UAV-R та UAV-FPV при місії польоту БПЛА-FPV в режимі КРР з функцією оминання об’єктних перешкод на мінімально-можливих висотах 10м...20м над поверхнею Землі. На рис. 1 наведений приклад випадку “гребінки” із дев’яти об’єктних перешкод. Із рис. 1 очевидно, що для забезпечення “відкритості радіоінтервалу” в точці враження цілі “С” необхідно застосувати БПЛА-ретранслятор з прийомо-передавачем в точці А2 з висотою “зависання” h_1 .

Розглянемо поняття “відкритості радіоінтервалу”. “Відкритий радіоінтервал”, це інтервал радіолінії зв’язку, коли перша зона Френеля вільна від об’єктних перешкод.

Доцільно відзначити, що для забезпечення польотної місії БПЛА-FPV в КРР на максимально-можливу дальність d_0 [км] не достатньо забезпечити лише умову “прямої видимості” (LoS) між СНК та БПЛА, необхідно забезпечити умову “відкритості радіолінії” (А2;С), рис.1, протягом всієї польотної місії, до моменту влучання в ціль [22].

На основі аналізу рис. 1 робимо висновок, що для забезпечення максимально можливої відстані польоту БПЛА FPV в режимі КРР необхідно забезпечити одночасно два критерія: LoS та “відкритості радіолінії” із застосуванням ретранслятора data-link UAV-R. Отже, необхідно використати двохінтервальну радіолінію зв’язку типу: data-link1 – відрізок (А1;А2); data-link2 – відрізок (А2;С), рис.1.

Також, згідно академічної теорії [22], при використанні частотних діапазонів радіохвиль вище за 3 ГГц, явище дифракції, “оминання радіохвилею об’єктних перешкод”, відсутнє, що обумовлює необхідність використання польоту при наявності обов’язково “відкритого радіоінтервалу”.

Умови виконання польоту БПЛА-FPV в режимі КРР на максимально можливу задану відстань (d_{0max}). Таким чином, при відомих реальних значеннях параметрів прийомо-передавача БПЛА та СНК [4], з урахуванням технічних можливостей антенно-фідерного тракту, максимальна дальність польоту БПЛА-FPV в режимі КРР, досягається за умови забезпечення в реальному часі на всьому інтервалі польоту відсутності об’єктних перешкод (бідівель, лісосмуг, лісових насаджень та інші) на шляху розповсюдження електромагнітних хвиль в заданому діапазоні частот. Дана вимога забезпечується за умови застосування ретранслятора радіолінії, тобто наявність БПЛА-ретранслятора (UAV-R), який “зависає” на необхідній висоті та забезпечує наявність “відкритої радіолінії” між приймачем/передавачем БПЛА-Р та приймачем/передавачем БПЛА-FPV, який виконує бойову задачу і таким чином реалізується двохінтервальна радіолінія Data-Link.

Адаптація параметрів польотної місії LSS-UAV-FPV

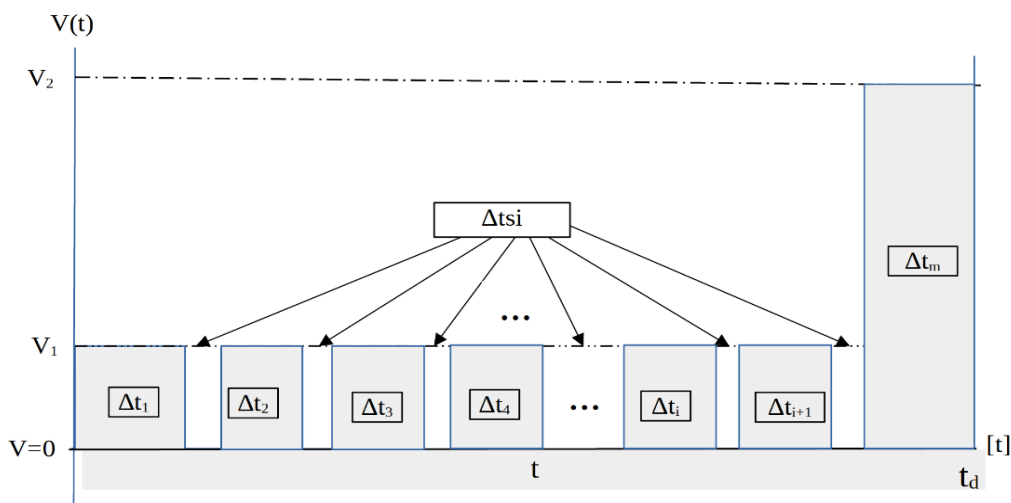
Розглянемо вимоги до висоти польоту. Оптимізація в реальному часі висоти польоту $h = \Phi(d_i)$, як функція від відстані між UAV-R та UAV-FPV d_i : політ на надмалих висотах забезпечується за рахунок оптимізації параметрів $h_1 = \Phi(\text{varia}, d_i, \min)$ та $h_2 = \Phi(\text{varia}, d_i, \min)$ при забезпеченні критерію “відкритості” радіо data-link між СНК та UAV-FPV - (вимога до елементу IS №1). Цільова функція оптимізації — мінімізація параметрів $h_1 = \min$ та $h_2 = \min$, (рис.1), на всій стадії польоту UAV-FPV в режимі КРР. Виконання в адаптивному режимі даного критерію значно підвищує захищеність БПЛА від засобів С-UAS, ТЗРК, ОРЛС.

Суть оптимізації параметрів висоти польоту обґрунтована в [1, 4] та виконується на основі вбудованої системи налізу розповсюдження радіохвиль на борту UAV-R та UAV-FPV. Основний параметр, який забезпечує вище зазначену функцію оптимізації P_2 є необхідний рівень сигналу в режимі on-line на прийомі приймача UAV-FPV на всьому інтервалі польоту, як функція від d_i (відстані між UAV-R та UAV-FPV) при забезпеченні енергетичного запасу (margin) $\Delta P > 7\text{дБ}$.

$$\Delta P = P_2(d_i) - P_0, \quad (2)$$

де P_0 – чутливість радіоприймача при $BER=10e-6$ [25], при заданому виді модуляції, при заданій швидкості передачі (B), та ширині спектру радіосигналу ΔF_s з урахуванням, що при відповідній швидкості польоту V_i відліки вимірювань P_2 повинні оновлюватися кожну секунду; ΔP – даний параметр визначається експериментально на імітаторі радіолінії для кожного типу або модифікації радіостанції окремо [4], як правило, на основі експериментального аналізу різних типів радіостанцій для data-lik $\Delta P=7$ дБ. Акцентуємо на тому, що параметр $P_2(d_i)$ для кожної системи у складі UAV-R та UAV-FPV фіксується в польотній карті [1, 4].

Розглянемо вимоги до швидкості польоту. Оптимізація (адаптація) в реальному часі швидкості польоту V виконується наступним чином. Політ на різних етапах траси з різною швидкістю та з моментами “зависання” при забезпеченні критерію “невизначеності” для тактичних радіолокаційних станцій, які працюють у складі антидронових систем C-UAS (вимога до елементу IS №2). Деталізуємо цю вимогу: 1) на першому етапі польоту відбувається політ зі швидкістю птаха 10...15 м/с із зависанням польоту через визначені інтервали часу Δt_i , які корелюються з відстанню польоту d_i для мінімізації ефекту Доплера [22], щоб максимально ускладнити системам РЛС у складі C-UAS факт виявлення UAV-FPV; 2) на кінцевому етапі польоту — за 1000 м до цілі ураження відбувається політ на максимальній швидкості 60 м/с (216 км/год) в режимі націлювання FPV та захвату цілі за допомогою машинного зору — як елементу IS. Алгоритм адаптації параметра V як функції від відстані до цілі d_0 та часу польоту t представлений на рис. 2



$(V=\Phi(d_0, t_i))$.

Рис.2. Схема адаптації параметра V як функції від відстані до цілі d_0 та часу польоту t на кінцевому етапі ураження: V_1 – середня швидкість польоту LSS-FPV в режимі KPP на стадіях польотної місії $(\Delta t_1, \dots, \Delta t_{i+1})$, до моменту виходу на режим враження цілі; як правило, в межах 10...15 м/с; V_2 – середня швидкість польоту LSS-FPV в режимі KPP на останній стадії польотної місії Δt_m , в момент виходу в режим враження цілі; як правило, в межах 100 м/с; $\Delta t_1, \dots, \Delta t_{i+1}$ – часові інтервали польоту зі швидкістю V_1 ; Δt_m – часовий інтервал польоту зі швидкістю V_2 на останній стадії польоту; $V(t)$ – функція, залежність швидкості польоту V від часу t , з моменту вильоту LSS-UAV в режимі KPPT; Δt_{si} – часові інтервали польоту зі швидкістю $V=0$, моменти “зависання” LSS-UAV в режимі KPPT на надмалих висотах 10...20м (при необхідності висота зависання може бути меншою за 5 м); t_d – термін польоту в часі моменту вильоту LSS-UAV в режимі KPP до моменту враження цілі як функція від дальності до цілі d_0 (рис.1) та параметрів V_1 та V_2

На основі аналізу рис. 2 робимо висновок, що для забезпечення захисту від виявлення засобами ворожих РЛС, які діють у складі C-UAS (для мінімізації ефекту Доплера) доцільно використовувати ефект “стрибків” швидкості польоту із застосуванням режиму “зависання” в часових інтервалах Δt_{si} , коли $V=0$. Параметри Δt_{si} та Δt_i визначаються засобами IS в залежності від типу UAS, її характеристик та дальності до цілі d_0 .

Розглянемо вимоги до ефективної площі розсіювання (ЕПР) [26]. ЕПР є ключовим параметром, який визначає відстань виявлення LSS-UAV в режимі KPPT засобами РЛС у складі C-UAS, на останній стадії польоту (часовий інтервал Δt_m , рис.2) коли LSS-UAV заходить в зону LoS РЛС. Як правило $ЕПР=0,005...0,01$ м² для LSS-UAV. Для систем C-UAV існує “мертва зона” — це відстань d_g (радіус зони), при зальоті в яку LSS-UAV стає невразливим для виявлення засобами РЛС у складі C-UAS, а існуючими засобами ракетного ураження неможливо вразити LSS-UAV через значне запізнення реакції команди на ураження, яка складається із часу виявлення LSS-UAV, часу обробки інформації, часу на прийняття рішення на ураження та часу польоту засобів ураження.

Суть адаптації та комплексування ЕПР зводиться до наступного - одночасно (синхронно) в ЗПБД повинні залетіти LSS-UAV в режимі KPP із різних напрямків в секторі $0...180$ градусів і з різними значеннями ЕПР. Причому, чим більша відстань польоту тим більше значення ЕПР LSS-UAV. Це очевидний технологічний фактор, який розглянутий в [2]. Організуючи політ одночасно зграї дронів, які вилітають з різних відстаней від лінії бойового зіткнення (ЛБЗ), та синхронізуючи їх одночасний приліт в ЗПБД в момент часового інтервалу Δt_m (рис.2) ворожий засіб C-UAS в першу чергу акцентує увагу на ЕПР LSS-UAV більшого розміру, що значно підвищує ефективність невразливості ЕПР LSS-UAV, який вилітає з малої відстані, та підвищує вірогідність знищення ворожих C-UAS саме LSS-UAV ЗСУ з малими розмірами.

Нарешті розглянемо вимоги до кількості LSS-UAV у складі зграї. Кількість (адаптація параметра "n") LSS-UAV визначається засобами бази нейронної мережі IS на основі наступних показників:

- даних розвідки ЗСУ в реальному часі стосовно кількості цілей, які необхідно вразити в першу чергу в реальному часі;

- кількість засобів C-UAS ворога які знаходяться в ЗПБД;

- кількість засобів C-UAS які знаходяться в ЗПБД та які необхідно вразити в першу чергу та їх технічними можливостями стосовно ефективності їх засобів фізичного ураження.

- кількість ОРЕБ яку необхідно вразити.

Тепер розглянемо питання адаптація до завадової обстановки стосовно захисту від активних загороджувальних завад (Adaptive Anti-Jamming).

Особливості завадової обстановки визначені в початкових даних — ворог застосовує активну загороджувальну заваду в полосі частот $0,3\text{ГГц} \dots 6\text{ГГц}$.

Суть адаптації до існуючої завадової обстановки в реальному часі обґрунтована в [1, 4] та виконується на основі Вбудованої Системи Аналізу Завадової Обстановки (ВСАЗО), яка знаходиться на борту UAV-R та LSS-UAV-FPV-KPP. Основні параметри які забезпечують вище зазначену функцію оптимізації [1]:

- функція BER (Bit Error Rate) [25] - коефіцієнт помилок на вході приймача радіостанції UAV-R та UAV-FPV (вимірювання в реальному часі);

- візуальне зображення на моніторі огинаючої спектру частот радіосигналу вході приймача радіостанції UAV-R та UAV-FPV (вимірювання в реальному часі);

- констеляційною діаграмою [25] (вимірювання в реальному часі);

- еквалайзер-граф - графік аплітудно-частотної характеристики (АЧХ) радіоканалу на вході приймача радіостанції UAV-R та UAV-FPV (вимірювання в реальному часі);

- відношення сигнал/шум (S/N) або ідентичні (вимірювання в реальному часі).

Необхідно відмітити, що вимірювання можливо виконувати в реальному часі через певні проміжки часу, які обмежені можливостями вимірювальної апаратури (як правило, в сучасних системах, через кожну секунду польоту), або в моменти "зависання" LCC-UAV-KPP (Δt_{si} , рис.2).

Частотний діапазон радіолінії command & control (C2). LCC-UAV-FPV-KPP керується в ручному або в автоматичному режимі на основі IS за допомогою C2 data-link [1-6].

На рис. 3 відображений принцип застосування різних частотних діапазонів (band) для C2 data-link для зграї дронів в умовах активних загороджувальних завад які використовує ворог засобами ОРЕБ. Даний принцип застосування діапазонів частот назовемо - «Принцип Штучного Розширення Спектру Частот в конфігурації одночасного застосування зграї дронів в ЗПБД» (ПШРСЧ).

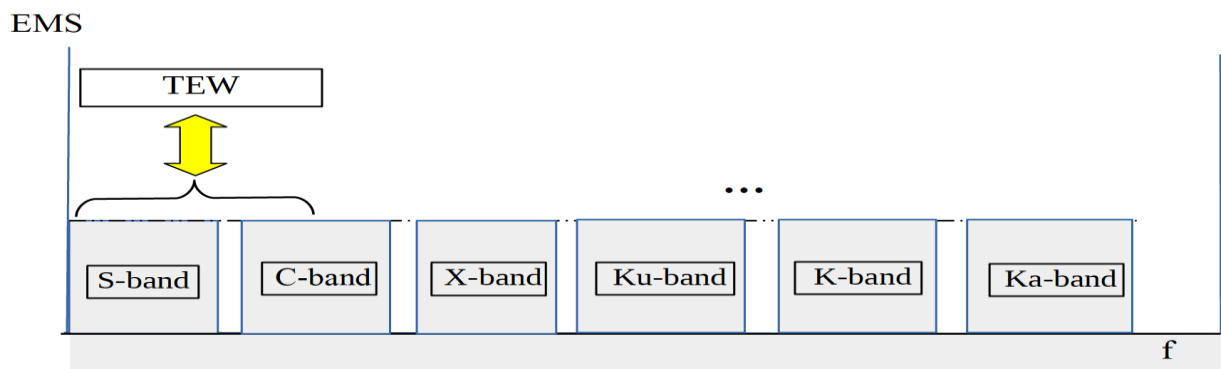


Рис.3. Принцип ПШРСЧ для C2 data-link для зграї дронів в умовах активних загороджувальних завад окопного РЕБ: Trench EW (TEW) (окопна, траншейна РЕБ), діапазон $0,3...6\text{ГГц}$; Electromagnetic Spectrum (EMS) — електромагнітний спектр, стосовно радіохвиль; Electronic Warfare (EW) — електронна війна (РЕБ), frequency band — діапазон частот

На основі аналізу рис. 3 робимо висновок, що з переліку діапазонів радіочастот [19], L-band (1,0 ГГц — 2,0 ГГц); S-band (2,0 ГГц — 4,0 ГГц); C-band (4,0 ГГц — 8,0 ГГц); X-band (8,0 ГГц — 12,0 ГГц); Ku-band (12,0 ГГц — 18,0 ГГц); K-band (18,0 ГГц — 26,5 ГГц); Ka-band (26,5 ГГц — 40,0 ГГц), з урахуванням можливостей систем ворога ОРЕБ, доцільно використовувати адаптацію наступних діапазонів для C2 data-link:

- C-band (від 7,0 ГГц — 8,0 ГГц) - для відстаней польоту $d_0(C) = 40...50$ км і режиму FPV;
- X-band (8,0 ГГц — 12,0 ГГц) - для відстаней польоту $d_0(X) = 25...40$ км і режиму FPV;
- Ku-band (12,0 ГГц — 18,0 ГГц) - для відстаней польоту $d_0(Ku) = 15...25$ км і режиму FPV;
- K-band (18,0 ГГц — 26,5 ГГц); для відстаней польоту $d_0(K) = 5...15$ км і режиму FPV;
- Ka-band (26,5 ГГц — 40,0 ГГц); для відстаней польоту $d_0(Ka) = 3...5$ км і режиму FPV;

де значення d_0 візуалізовано на рис. 1.

Параметри $d_0(C)$, $d_0(X)$, $d_0(Ku)$, $d_0(K)$, $d_0(Ka)$ визначені на основі розрахунків REC. ITU-R P.525-3, REC. ITU-R P.341-7, REC. ITU-R P.530-18, REC. ITU-R P.676-7 в умовах “відкритої радіолінії” (надалі — Open Data Link, зкорочено “ODL”) та LoS (рис.1), відсутності густого туману, відсутності зливи, відсутності застосування аерозолів, тобто в умовах, коли, згідно метеорологічних вимог дозволено виліт LSS-UAV-FPV-KPP.

Також кожний параметр із переліку $d_0(C)$, $d_0(X)$, $d_0(Ku)$, $d_0(K)$, $d_0(Ka)$ залежить від параметрів прийомо-передавача, а саме потужності передавача (P_{tx}), чутливості приймача (P_{rx}), виду модуляції (FSK, QAM, тощо [25]), ширини спектру радіосигналу (ΔF_s), швидкості передачі інформації (B), від коефіцієнту підсилення антен (G_a) та відповідно від рівня їх спрямованості, від затухання в антенно-фідерних трактах ($A_{афт}$) [27], тощо [4].

В [1], як приклад, наведений деталізований розрахунок для $d_0(Ka)$ для конкретного типу прийомо-передавача та застосування спеціальної направленої антени за умов відсутності антенного трекінгу.

Частотний діапазон радіолінії data-link FPV. На борту LCC-UAV-KPP заходяться цифрові камери денного та нічного бачення, а також нічні тепловізійні камери які забезпечують режим FPV та можливість реалізації польоту в режимі KPP при відсутності сигналів системи глобальної супутникової навігації, коли дані сигнали подавлені заводою керується. При цьому цифровий відеосигнал передається з борта LCC-UAV-KPP на UAV-R, а потім через режим ретрансляції до СНК (станції наземного керування).

Принцип застосування частотних діапазонів аналогічний, як для радіолінії command & control (C2) (рис.3).

Розглянемо особливості псевдовипадкової перестройки частоти по команді (ПВПРК). Для передачі радіосигналів з вибраною модуляцією в кожному частотному діапазоні згідно рис.3 застосовується вузькосмуговий радіосигнал з шириною спектру $\Delta F_s = 1,75...14$ МГц для забезпечення необхідної швидкості передачі відеоінформації $B = 5...14$ Мбіт/с в режимі дуплексу та для забезпечення мінімальних затримок відеоданих не більше 60 мс. Дана технологія передачі аналогічна радіорелейній радіолінії та використовує дуплексний режим передачі з відповідним рознесенням частоти передачі та прийому. При цьому кожний data-link для UAS має пару частот, частоту передачі f_{tx} частоту прийому f_{rx} з відповідним фіксованим дуплексним рознесенням Δf_d для кожного із зазначених діапазонів на рис.3.

При виявленні Системою Аналізу Заводової Обстановки (САЗО) яка знаходиться на борту LCC-UAV-FPV-KPP та на боту UAV-R вузькосмугової завади, в полосі спектру сигналу ΔF_s на вході радіоприймача, засобами IS, виконується команда на синхронний перехід на іншу пару частот в тому діапазоні частот, який відображений на рис. 3.

При виявленні САЗО, яка знаходиться на борту LCC-UAV-FPV-KPP та на боту UAV-R, загороджувальної завади типу “білий гаусівський шум” в смузі частот (C...Ka-band) (рис. 3) на вході радіоприймача, засобами IS виконується команда припинення виконання польотної місії для того LCC-UAV-FPV-KPP із зграї, приймач якого вражений даним типом завади. Дана команда реалізується засобами IS автоматично, з поверненням на вказану точку (або на базу), використовуючи систему навігації на основі візуальної одометрії, без застосування інерціальної системи навігації та глобальної супутникової системи навігації.

Для виконання синхронної перестройки пари частот на борту LCC-UAV-FPV-KPP та UAV-R, для забезпечення збереження якості data-link, LCC-UAV-FPV-KPP “зависає” в польоті на певний часовий інтервал, коли швидкість польоту його $V=0$ (див. рис. 2., часовий проміжок Δt_{si}).

Розглянемо принцип формування частотно-часової матриці (ЧЧМ). На рис. 4 відображений принцип ЧЧМ. Політ зграї LCC-UAV-FPV-KPP в кількості з k (в даному випадку 4 групи по 3 одиниці в кожній, тобто 12 одиниць) розподіляється на етапи при виконанні польоту в ЗПБД. На кожному етапі проміжком ΔT_i , як приклад, застосовуються три LCC-UAV-KPP, кожний з яких використовує частотний діапазон band, який не пересікається з іншим в частотному спектрі та робастний до ОРЕБ. В кожному частотному діапазоні band виконується (у випадку виявлення вузько-смугової активної завади) незалежна псевдовипадкова перестройка пари частот радіолінії (PRA2FC) по команді яку надає IS. При цьому на кожному часовому інтервалі ($T_1, T_2, ... T_k$) виконується, при умові виявлення активної загороджувальної завади в полосі частот

band, незалежна псевдовипадкова перестройка діапазону частот (PRAFBC) по команді, що надає IS. Як приклад, на рис. 4 відображено 4 етапи реалізації бойового завдання для групи зграї дронів де кожний етап має своє значення ΔT (свій часовий інтервал), який визначається та керується засобами IS, та свій набір частотних діапазонів PRAFBCi.

На основі аналізу рис.3 та рис.4 встановлено нову ефективність в сегменті захисту від виявлення LSS-UAV-FPV-KPP засобами розвідки C-UAS.

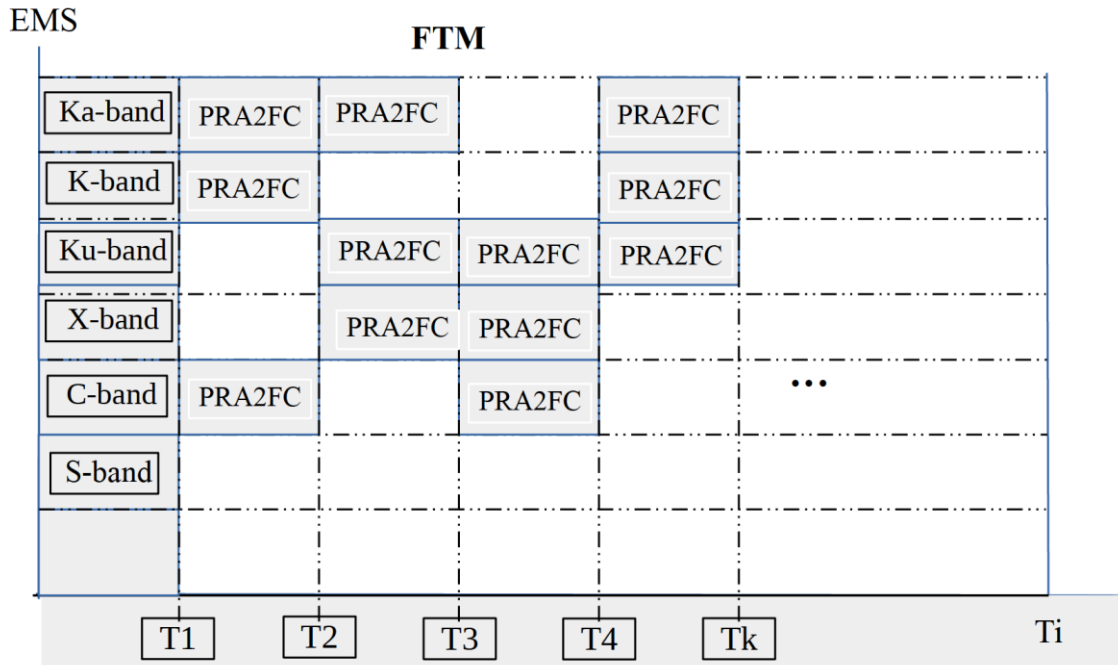


Рис.4. Принцип комплексного застосування FTM, PRA2FC та PRAFBC при використанні зграї LSS-UAV-FPV-KPP в ЗПБД; FTM – частотно-часова матриця ЧЧМ (Frequency-Time Matrix); EMS - електромагнітний спектр, стосовно радіохвиль (Electromagnetic Spectrum); T_i – час доби, 0...24 години; $T_{1..4}$ – час зміни частотних діапазонів band; PRA2FC- псевдовипадкова перестройка пари частот радіолінії data-link по команді в межах частотного діапазону band (Pseudo-random adjustment of the dual-frequency data-link on command); PRAFBC - псевдовипадкова перестройка частотного діапазону band по команді (Pseudo-random adjustment of the frequency band on command) - набір частотних діапазонів для зграї дронів, для T_i .

Ефективність аналізаторів спектру системами радіотехнічної розвідки та аналізу спектру C-UAS може бути знижена в умовах високої перевантаженості радіочастотного спектру радіочастот через насичення за рахунок комплексного використання адаптивного FTM, PRA2FC та PRAFBC, тобто поєднання наступних методів завадозахисту:

- адаптивного штучного розширення спектру частот;
- псевдовипадкової перестройки частотного діапазону по команді в полісі частот band, від 7 ГГц до 40 ГГц;
- псевдовипадкової перестройки пар частот кожної data link по команді в межах кожного піддіапазону частот: C-band (4,0 ГГц — 8,0 ГГц); X-band (8,0 ГГц — 12,0 ГГц); Ku-band (12,0 ГГц 18,0 ГГц); K-band (18,0 ГГц — 26,5 ГГц); Ka-band (26,5 ГГц — 40,0 ГГц).

Дану методику, яка комплексує вище зазначені методи в подальшому будемо називати - адаптивна методика використання електромагнітного спектру радіочастот для зграї дронів (методика - АМ-ЕМС-РЧ-UAV).

Наступним етапом, розглянемо адаптивний захист від засобів сигнальної розвідки противника (Adaptive Anti Signals Intelligence (Adapt-Anti-SIGINT*).

На основі аналізу принципів, відображених на рис.3 та рис 4, встановлено новий підхід в сегменті захисту від виявлення LSS-UAV-FPV-KPP засобами C-UAS, а саме, ефективність аналізаторів спектру системами радіотехнічної розвідки та налізу спектру SIGINT, які знаходяться у складі C-UAS, може бути знижена в полісі частот від 7 ГГц до 40 ГГц.

Результатом дослідження є синтез комплексного підходу застосування елементів IS на основі адаптивних підсистем, який відображений блок-схемою взаємозв'язків різних підсистем на рис. 5.

На рис. 5 представлена блок-схема синтезованого комплексного підходу застосування елементів інтелектуальної системи для реалізації польоту зграї ударних БпЛА-FPV в режимі крилатої ракети на максимальну відстань в умовах активних загороджувальних завад та дії систем ОРЕБ, С-UAS, ТЗПК, ОРЛС.

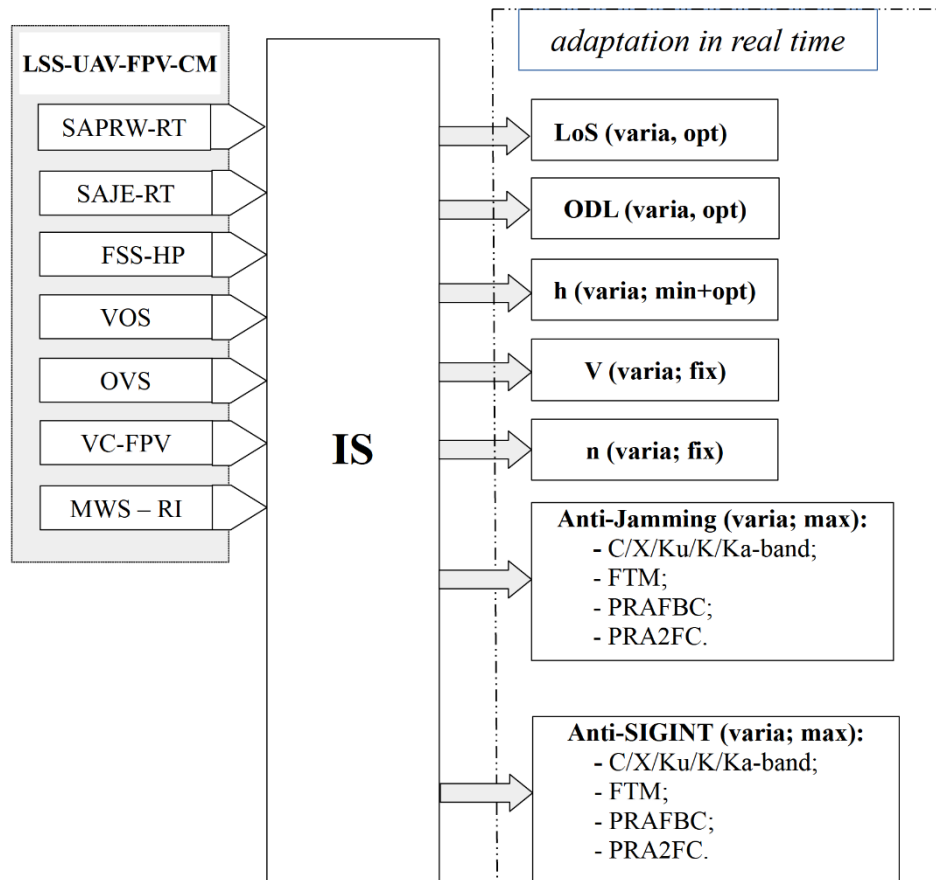


Рис.5. Блок-схема синтезованого комплексного підходу застосування елементів інтелектуальної системи для реалізації польоту зграї ударних LSS-UAV-FPV в режимі крилатої ракети на максимальну відстань в умовах активних загороджувальних завад та дії систем ОРЕБ, С-UAS, ТЗПК, ОРЛС: LSS-UAV-FPV-СМ - LSS БпЛА в режимі FPV та в режимі польоту «крилатої ракети»; СМ - крилатої ракета (Cruise Missiles); SAPRW-RT - бортова система аналізу розповсюдження радіохвиль в режимі реального часу (System for Analyzing the Propagation of Radio Waves in Real Time); SAJE-RT - бортова система аналізу завадової обстановки в режимі реального часу (System for Analyzing the Jamming Environment in Real Time); FSS-HP - бортова система стабілізації польоту БпЛА в горизонтальній площині (Flight Stabilization System in the Horizontal Plane); VOS - бортова система візуальної одометрії (Visual Odometry System); VO - візуальна одометрія (Visual Odometry); OVS - бортовий візуальний сенсор (onboard visual sensors); VC - FPV - бортові візуальні камери в режимі FPV, як правило в кількості не менше 2 комплектів (visual cameras); MWS - RI - мікрохвильові датчики, що створюють радарні зображення MicroWave Sensors Like Radar Images; adaptation in real time - адаптація в реальному часі; ODL - умови «відкритої радіо-лінії» (open Data-link); h - висота польоту UAV над поверхнею Землі; V - швидкість польоту UAV; RCS - ефективна площа розсіювання (ЕПП), стосовно параметрів чутливості радарної системи виявлення (Radar Cross Section) [26]; n - кількість та тип UAV в зграї, з параметрами габаритів, тобто з відповідним параметром RCS, який напряму залежить від запланованої дальності польотної місії; Anti-jamming - захист від активних радіозавад; Anti- SIGINT - захист від сигнальної розвідки; band - відповідні стандартизовані діапазони частот C/X/Ku/K/Ka; FTM - частотно-часова матриця, ЧЧМ (Frequency-Time Matrix); PRA2FC - псевдовипадкова перестройка пари частот радіо-лінії data-link по команді в межах частотного діапазону band (Pseudo-random adjustment of the dual-frequency data-link on command); PRAFBC - псевдовипадкова перестройка частотного діапазону band по команді (Pseudo-random adjustment of the frequency band on command); varia - зміна параметрів в часі; fix - вибір фіксованих параметрів; min - мінімізація значення параметра; max - максимізація; opt - оптимізація

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Синтезований алгоритм польоту LSS-UAV-FPV-KPP у складі зграї БпЛА з використанням комплексного (одночасного) застосування різноманітних методів захисту даного БпЛА від різних ворожих систем (від ОРЕБ, С-UAS, ТЗПК, ОРЛС).

На основі розробленого алгоритму польоту синтезований комплексний підхід застосування

елементів IS для забезпечення максимальної дальності польоту БПЛА-FPV в режимі “камікадзе - крилата ракета” (KPP) в умовах активних загороджувальних завад ворога, відсутності (радіоподавлення) глобальної системи супутникової навігації та в умовах неточної (некоректної роботи з великою похибкою) інерціальної системи навігації з подальшим обґрунтуванням та розробкою вимог до елементів UAS при реалізації польоту зграї БПЛА, а саме:

- наявність на борту LSS-UAV-FPV-KPP та UAV-R адаптивної системи аналізу завадової обстановки в реальному часі, SAJE-RT (рис.5);
- наявність на борту LSS-UAV-FPV-KPP та UAV-R адаптивної системи аналізу умов розповсюдження радіохвиль в реальному часі виконання польотної місії; SAPRW-RT (рис.5);
- використання синтезованого принципу адаптації швидкості польоту (рис.2);
- використання розробленого принципу ПШРСЧ для C2 data-link та FPV data-link для зграї дронів в умовах активних загороджувальних завад окопного РЕБу (рис.3), “Принцип Штучного Розширення Спектру Частот в конфігурації одночасного застосування зграї дронів”;
- використання синтезованого принципу ПВПЧДК при використанні зграї LSS-UAV-FPV-KPP в ЗПБД. Принцип псевдо-випадкова перестройка частотного діапазону по команді;
- обґрунтована необхідність реалізації data-link в спектрі частот сантиметрових радіохвиль 7...40 ГГц (рис.3) та обґрунтована максимально можлива дальність польоту LSS-UAV-FPV-KPP в залежності від частотного діапазону;
- синтезована структурна схема комплексного підходу застосування елементів IS для успішної реалізації польоту LSS-UAV-FPV-KPP у складі зграї UAV в умовах активних дій різних ворожих систем (ОРЕБ, С-UAS, ТЗРК, ОРЛС);
- обґрунтовані основні принципи застосування IS, базуючись на початкових даних завадової обстановки на умов розповсюдження радіохвиль.

Основними результатами статті також є концентрація уваги розробників LSS-UAV-FPV-KPP на актуальності практики розв’язання проблем, пов’язаних з розробкою комплексних технологічних рішень по гарантованому захисту радіолінії зв’язку data-link між БПЛА та СНК при виконанні польотної місії на відстань до 50 км в умовах відсутності дощу, щільного туману та поривів вітру. Отримані результати проведеного дослідження дозволяють визначити основні принципи розробки та застосування IS в аспекті протидії ворожим системам ОРЕБ, С-UAS, ТЗРК, ОРЛС та які діють в діапазоні частот від 0,1 до 18 ГГц.

Матеріали статті можуть бути корисними розробникам БПЛА тактичного рівня мультироторного типу, класу міні, злітною масою до 15 кг, а також науковцям та дослідникам в сегменті захисту від РЕБ ворога радіоліній зв’язку БПЛА військового призначення тактичної ланки (data-link for UAV в діапазоні частот 7...40 ГГц).

Перспективи подальших розвідок у даному напрямі полягають у вдосконаленні алгоритмів польоту для зграї БПЛА, зокрема через інтеграцію новітніх методів захисту та розширення можливостей адаптивних систем аналізу завадової обстановки в реальному часі. Це дозволить забезпечити надійний захист від широкого спектра ворожих систем, таких як ОРЕБ, С-UAS, ТЗРК, ОРЛС, а також покращить ефективність виконання місії у складних умовах, таких як відсутність GPS та радіоподавлення. Враховуючи досягнуті результати, наступним етапом є подальший розвиток інтелектуальних систем, здатних динамічно адаптуватися до змінюваних умов середовища та забезпечити стійкість зв’язку на великих відстанях навіть в умовах активних загороджувальних завад. У цьому контексті особливу увагу варто приділити розробці нових підходів до захисту радіоліній зв’язку в умовах військових конфліктів.

Література

1. Салій, О., Голь, В., Дівіцький, А., & Хахлюк, О. (2023). Комплексне рішення для завадозахищеної радіолінії передачі даних і управління безпілотним літальним пристроєм. Collection "Information Technology and Security", 11(2), 251–265. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2023.11.2.293939>.
2. Harrigian, J. L. (2021). A Comprehensive Approach to Countering Unmanned Aircraft Systems. Joint Air Power Competence Centre (JAPCC) (642 pages).
3. McDermott R. N. (2017). Russia’s Electronic Warfare Capabilities to 2025: Challenging NATO in the Electromagnetic Spectrum. In International Centre for Defence and Security, Tallinn, Estonia, 2017, (September 2017).
4. Салій, О., Василенко, С., Зінченко, Я., & Хахлюк, О. (2024). Алгоритм вимірювання параметрів радіолінії зв’язку сантиметрового діапазону безпілотного літального апарату в режимі FPV. Collection "Information Technology and Security", 12(1), 135–146. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2024.12.1.306279>.
5. Boiko, J., Svachii, O., & Kałaczyński, T. (2024). Control of unmanned aerial vehicle modules based on inertial measurement system and MEMS sensor. In MATEC Web of Conferences (Vol. 391, p. 01005). EDP Sciences.

6. Boiko, J., Svachii, O., Parkhomey, I., & Horskyi, O. (2023, October). Software Simulation of a MEMS Accelerometer for Cargo Unmanned Aerial Vehicle. In 2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (pp. 120-125). IEEE.
7. Austin, R. (2010). Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. A John Wiley and Sons, Ltd. (365 pages).
8. Rochus, W. W. (1999, September). UAV Data-Links: Tasks, Types, Technologies and Examples. In RTO AVT Course on "Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications" (pp. 1 – 43). RTO EN-9.
9. van Blyenburgh, P. (1999, September). UAVs - current situation and considerations for the way forward. In RTO AVT Course on "Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications" (pp. 1 – 27). RTO EN-9.
10. Delogne, R. (1999, September). The B-HUNTER UAV System. n RTO AVT Course on "Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications" (pp. 11 –17). RTO EN-9.
11. Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications: RTO EDUCATIONAL NOTES 9. Available online: URL <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA390637.pdf> (accessed on 14 January 2025).
12. Шалигін, А. А., Нерубацький, В. О., Кудрявцев, А. Ф., Александров, О. В., & Ситник, Ю. Б. (2022). Підвищення точності автономної навігації невеликих безпілотних літальних апаратів за рахунок врахування вітру та похибок сенсорів. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 3 (48), 44-50. <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.48.05>.
13. Фесенко, О. (2021, Листопад). Методика керування траєкторією БпЛА в автономному режимі польоту на основі нейромережевого алгоритму MELM – MADGWICK. Доповіді та тези доповідей конференції ВІТІ МО України, II Міжнародна науково-технічна конференція “Системи і технології зв’язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку” (с. 37 – 44), ВІТІ ім. Героїв Крут.
14. Інформаційно-аналітичні матеріали щодо можливостей виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів засобами технічної розвідки зс рф: Засоби радіоелектронної боротьби ворога. Available online: <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/zasobi-radioelektronnoi-borotbi-voroga> (дата звернення 17.06.2024).
15. TEXTY.ORG.UA: Російська ПВО безсила проти сучасних дронів. Українська теж. Available online: <https://texty.org.ua/fragments/102589/za-rezultatamy-navchan-rosiya-rozpysalas-u-bezporadnosti-svoiyih-zenitok-proti-droniv/> (дата звернення 18.06.2024).
16. ITU-R Recommendations: ITU-R P.530-18 (09/2021). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. P Series. Radiowave propagation. ITU 2017. Available online: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en> (accessed on 14 January 2025).
17. ITU-R Recommendations: Recommendation ITU-R P.341-7 (2019). The concept of transmission loss for radio links. P Series. Radiowave propagation. ITU 2017. Available online: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en> (accessed on 14 January 2025).
18. ITU-R Recommendations: Recommendation ITU-R P.310-10 (08/2019) Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media. ITU 2019. Available online: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en> (accessed on 14 January 2025).
19. ITU-R Recommendations: Recommendation ITU-R P.525-3 (09/2016). Calculation of free-space attenuation. P Series. Radiowave propagation. ITU 2016. Available online: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en> (accessed on 14 January 2025).
20. ITU-R Recommendations: Recommendation ITU-R P.676-7. Attenuation by atmospheric gases. P Series. Radiowave propagation. ITU 2007. Available online: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en> (accessed on 14 January 2025).
21. ITU-R Recommendations: Recommendation ITU-R V.431-8 (08/2015). Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications. V Series. Vocabulary and related subjects. ITU 2015. Available online: https://www.itu.int/rec/R-REC-V.431/_page.print. (accessed on 14 January 2025).
22. Fock, V.A. (1945). Diffraction of radio-waves around the earth's surface. Journ. of Phys. of the U.S.S.R., 1(9), 255.
23. Feinberg, Ye. L. (1999). Rasprostranenie radiovoln vdol zemnoi poverkhnosti (2nd ed.). Nauka. Fizmatlit, 1999 (496 s).
24. Air force doctrine publication 2-0. Intelligence. appendix B: Intelligence disciplines. U.S. Air Force. 1 June 2023. Available online: https://www.doctrine.af.mil/Portals/61/documents/AFDP_2-0/2-0-AFDP-INTELLIGENCE.pdf (accessed on 14 January 2025).
25. Boiko, J., Pyatin, I., Karpova, L., & Eromenko, O. (2021). Study of the influence of changing signal propagation conditions in the communication channel on bit error rate. In Data-Centric Business and Applications: ICT Systems—Theory, Radio-Electronics, Information Technologies and Cybersecurity (pp. 79-103). Cham: Springer International Publishing.
26. Parkhomey, I., Boiko, J., & Eromenko, O. (2022). Methodology for the development of radar control systems for flying targets with an artificially reduced RCS. Journal of Robotics and Control (JRC), 3(4), 402-408.

27. Boiko, J., & Karpova, L. (2023, March). Increasing efficiency in the correlation processing of information signals for radar. In Proceedings of Fourth International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering: ICCES 2022 (pp. 549-569). Singapore: Springer Nature Singapore.

References

1. Saliy, O., Hol, V., Divitskiy, A., & Khakhlyuk, O. (2023). A complete solution for anti-jaming radio data-link of an unmanned aerial vehicle. Collection "Information Technology and Security", 11(2), 251–265. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2023.11.2.293939>.
2. Harrigan, J. L. (2021). A Comprehensive Approach to Countering Unmanned Aircraft Systems. Joint Air Power Competence Centre (JAPCC) (608 pages).
3. McDermott R. N. (2017). Russia's Electronic Warfare Capabilities to 2025: Challenging NATO in the Electromagnetic Spectrum. In International Centre for Defence and Security, Tallinn, Estonia, 2017, (September 2017).
4. Saliy, O., Vasylenko, S., Zinchenko, Y., & Khakhliuk, O. (2024). Algorithm for measuring parameters of radio link of an unmanned aircraft in fpv mode of the centimeter frequency range. Collection "Information Technology and Security", 12(1), 135–146. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2024.12.1.306279>
5. Boiko, J., Svachii, O., & Kałaczyński, T. (2024). Control of unmanned aerial vehicle modules based on inertial measurement system and MEMS sensor. In MATEC Web of Conferences (Vol. 391, p. 01005). EDP Sciences.
6. Boiko, J., Svachii, O., Parkhomey, I., & Horskyi, O. (2023, October). Software Simulation of a MEMS Accelerometer for Cargo Unmanned Aerial Vehicle. In 2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (pp. 120-125). IEEE.
7. Austin, R. (2010). Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. A John Wiley and Sons, Ltd. (365 pages).
8. Rochus, W. W. (1999, September). UAV Data-Links: Tasks, Types, Technologies and Examples. In RTO AVT Course on "Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications" (pp. 1 – 43). RTO EN-9.
9. van Blyenburgh, P. (1999, September). UAVs - current situation and considerations for the way forward. In RTO AVT Course on "Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications" (pp. 1 – 27). RTO EN-9.
10. Delogne, R. (1999, September). The B-HUNTER UAV System. In RTO AVT Course on "Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications" (pp. 11 –17). RTO EN-9.
11. Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications: RTO EDUCATIONAL NOTES 9. Available online: URL <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA390637.pdf> (accessed on 14 January 2025).
12. Shalyhin, A., Nerubatsky, V., Kudriavtsev, A., Aleksandrov, O., & Sytnyk, Y. (2022). Improving accuracy of autonomous navigation of small unmanned aerial vehicles by accounting for wind and sensor errors. Science and Technology of the Air Force of Ukraine, 3 (48), 44-50. <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.48.05>.
13. Fesenko, O. (2021, Lystopad). Metodyka keruvannya traiektoriieiu BpLA v avtonomnomu rezhymi polotu na osnovi neiromerezhevoho alhorytmu MELM – MADGWICK. Dopovidi ta tezy dopovidei konferentsii BITI MO Ukrainy, II Mizhnarodna naukovotekhnichna konferentsiia "Systemy i tekhnologii zviazku, informatyzatsii ta kiberbezpeky: aktualni pytannia i tendentsii rozvytku" (s. 37 – 44), VIII im. Heroiv Krut.
14. Informatsiino-analitychni materialy shchodo mozhyvosti vyavlennia malorozmirnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ zasobamy tekhnichnoi rozvidky zs rf: Zasoby radioelektronnoi borotby voroha. Available online: <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/zasobi-radioelektronnoi-borotbi-voroga> (data zvernennia 17.06.2024).
15. TEXTY.ORG.UA: Rosiiska PVO bezsyla proty suchasnykh droniv. Ukrainska tezh. Available online: <https://texty.org.ua/fragments/102589/za-rezultatamy-navchan-rosiya-rozpyshal-u-bezporadnosti-svoyih-zenitok-proty-droniv/> (data zvernennia 18.06.2024).
16. ITU-R Recommendations: ITU-R P.530-18 (09/2021). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. P Series. Radiowave propagation. ITU 2017. Available online: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en> (accessed on 14 January 2025).
17. ITU-R Recommendations: Recommendation ITU-R P.341-7 (2019). The concept of transmission loss for radio links. P Series. Radiowave propagation. ITU 2017. Available online: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en> (accessed on 14 January 2025)
18. ITU-R Recommendations: Recommendation ITU-R P.310-10 (08/2019) Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media. ITU 2019. Available online: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en> (accessed on 14 January 2025).
19. ITU-R Recommendations: Recommendation ITU-R P.525-3 (09/2016). Calculation of free-space attenuation. P Series. Radiowave propagation. ITU 2016. Available online: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en> (accessed on 14 January 2025).
20. ITU-R Recommendations: Recommendation ITU-R P.676-7. Attenuation by atmospheric gases. P Series. Radiowave propagation. ITU 2007. Available online: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en> (accessed on 14 January 2025).
21. ITU-R Recommendations: Recommendation ITU-R V.431-8 (08/2015). Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications. V Series. Vocabulary and related subjects. ITU 2015. Available online: https://www.itu.int/rec/R-REC-V.431/_page.print. (accessed on 14 January 2025).
22. Fock, V.A. (1945). Diffraction of radio-waves around the earth's surface. Journ. of Phys. of the U.S.S.R., 1(9), 255.
23. Feinberg, Ye. L. (1999). Rasprostranenie radiovoln vdol zemnoi poverkhnosti. (2nd ed.). Nauka. Fizmatlit, 1999 (496 s).
24. Air force doctrine publication 2-0. Intelligence. appendix B: Intelligence disciplines. U.S. Air Force. 1 June 2023. Available online: https://www.doctrine.af.mil/Portals/61/documents/AFDP_2-0/2-0-AFDP-INTELLIGENCE.pdf (accessed on 14 January 2025).
25. Boiko, J., Pyatin, I., Karpova, L., & Eromenko, O. (2021). Study of the influence of changing signal propagation conditions in the communication channel on bit error rate. In Data-Centric Business and Applications: ICT Systems—Theory, Radio-Electronics, Information Technologies and Cybersecurity (pp. 79-103). Cham: Springer International Publishing.
26. Parkhomey, I., Boiko, J., & Eromenko, O. (2022). Methodology for the development of radar control systems for flying targets with an artificially reduced RCS. Journal of Robotics and Control (JRC), 3(4), 402-408.
27. Boiko, J., & Karpova, L. (2023, March). Increasing efficiency in the correlation processing of information signals for radar. In Proceedings of Fourth International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering: ICCES 2022 (pp. 549-569). Singapore: Springer Nature Singapore.