Повітряне мінування як перспективний спосіб безпосереднього протиповітряного прикриття об'єктів та військ

Air Mining as a Promising Approach to Direct Air Defense of Objects and Troops

Павло Опенько [A]
Corresponding author: кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник кафедри, e-mail: pavel.openko@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7777-5101

Владислав Кобзєв [B]
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії, e-mail: vladiskob@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-0954-8887

Артем Ковтунов [B]
кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії, e-mail: covitolog@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9245-4365

Юрій Дзюбенко [A]
кандидат військових наук, доцент, доцент кафедри, e-mail: urdzu@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-9472-4332

Григорій Степанов [A]
кандидат військових наук, доцент, заступник начальника кафедри, e-mail: stepg72@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9190-2821

Павло Оріховський [A]
доцент кафедри, e-mail: pavor1968@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4309-154X

Pavlo Openko [A]
Corresponding author: Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department, e-mail: pavel.openko@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7777-5101

Vladislav Kobzev [B]
Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Researcher of the Scientific-Research Department, e-mail: vladiskob@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-0954-8887

Artem Kovtunov [B]
Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Scientific-Research Department, e-mail: covitolog@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9245-4365

Yurii Dziubenko [A]
Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department, e-mail: urdzu@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-9472-4332

Hryhorii Stepanov [A]
Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Department, e-mail: stepg72@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9190-2821

Pavlo Orikhovskyi [A]
Associate Professor of the Department, e-mail: pavor1968@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4309-154X

[A] Національний університет оборони України, м. Київ, Україна
[B] Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Україна

[A] National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[B] Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

Received: September 20, 2026 | Revised: October 29, 2026 | Accepted: October 31, 2026

УДК 623.746-519:355.48

DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.5.38

Мета роботи. Обґрунтувати концептуальні положення способу безпосереднього протиповітряного прикриття на основі просторового масиву безпілотних літальних апаратів (БпЛА)-перехоплювачів, визначити його особливості та основні технологічні обмеження.

Методи дослідження. Використано системний, структурно-функціональний і порівняльний аналіз, функціональну декомпозицію, концептуальне моделювання та аналіз технологічних вимог. Дослідження має теоретико-концептуальний характер.

Результати дослідження. Сформульовано поняття "повітряне мінування" як спосіб організації попередньо розгорнутого просторового масиву БпЛА-перехоплювачів. Запропоновано концептуальну модель, що поєднує підтримання функціональної готовності масиву, використання окремих елементів і відновлення його структури. Визначено відмінності між індивідуальним, груповим і ройовим застосуванням БпЛА. Уточнено, що чисельна щільність масиву не є самостійним показником ефективності прикриття. Виявлено технологічні обмеження, пов'язані з позиціонуванням, інформаційним обміном, управлінням і функціональною стійкістю.

Наукова новизна. Запропоновано концептуальне представлення просторового масиву БпЛА-перехоплювачів як єдиного

Purpose. To substantiate the conceptual foundations of a direct air defence approach based on a spatial array of unmanned aerial vehicle (UAV) interceptors, identify its distinctive features, and determine the principal technological constraints affecting its implementation.

Method. Systems analysis, structural and functional analysis, comparative analysis, functional decomposition, conceptual modelling, and technological requirements analysis were employed. The study is theoretical and conceptual in nature.

Results. The concept of "air mining" is defined as an approach involving a pre-deployed spatial array of UAV interceptors. A conceptual model is proposed that integrates the maintenance of the array's functional readiness, the employment of individual elements, and the restoration of its structure. Differences between individual-, group-, and swarm-based UAV employment are identified. It is established that the numerical density of the array cannot independently serve as an indicator of air defense effectiveness. Technological constraints related to positioning, information exchange, control, and functional resilience are identified.

Scientific novelty. A conceptual representation of a spatial array of UAV interceptors as an integrated, functionally restorable air defence resource is proposed. The approach combines the

функціонально відновлюваного ресурсу протиповітряного прикриття, що поєднує підтримання готовності, виконання завдань і відновлення структури.

Практичне значення. Результати створюють теоретичну основу для подальшого математичного та імітаційного моделювання, визначення показників функціонального стану й оцінювання технологічної реалізованості запропонованої концепції. Експериментальне підтвердження її ефективності не проводилося.

Тип статті: дослідницька стаття.

maintenance of readiness, mission execution, and structural restoration within a unified conceptual framework.

Practical implications. The findings provide a theoretical basis for further mathematical and simulation modelling, the development of functional-state indicators, and the assessment of the proposed concept's technological feasibility. Its effectiveness has not been experimentally validated.

Article type: Research Article.

Ключові слова: протиповітряна оборона, безпілотний літальний апарат, БпЛА-перехоплювач, повітряне мінування, просторовий масив, ройове управління, функціональна стійкість.

Keywords: air defence, unmanned aerial vehicle, UAV interceptor, air mining, spatial array, swarm control, functional resilience.

Вступ

Досвід Війни за Незалежність України засвідчує суттєве зростання масштабів застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та трансформацію підходів до протидії повітряним загрозам. Масоване використання відносно недорогих ударних БпЛА створює додаткове навантаження на систему протиповітряної оборони (ППО), зокрема через одночасну появу значної кількості повітряних цілей. За таких умов ефективність протиповітряного прикриття визначається не лише здатністю уражати окремі цілі, а й наявністю достатньої кількості засобів перехоплення, своєчасністю реагування, раціональністю використання ресурсів та можливістю масштабування системи відповідно до інтенсивності повітряних загроз [1–4].

Сучасні дослідження свідчать про необхідність формування ешелонованої системи протидії БпЛА, що поєднує різні засоби виявлення, супроводження, управління та ураження повітряних цілей [1]. Водночас розвиток технологій протидії безпілотним системам характеризується посиленням інтеграції багатоспектральних засобів виявлення, автоматизованого оброблення інформації, підтримки прийняття рішень і різних способів нейтралізації повітряних загроз [5–7]. Особливого значення набуває забезпечення узгодженого функціонування цих компонентів в умовах обмеженості ресурсів і високої інтенсивності застосування противником засобів повітряного нападу.

Практичний досвід України підтверджує актуальність проблеми масштабування протиповітряної оборони. Зокрема, за даними, наведеними у джерелі [3], 24 березня 2026 року противник застосував 999 ударних БпЛА різних типів, з яких українськими силами оборони було нейтралізовано понад 94 %. За даними джерела [4], протягом березня 2026 року зафіксовано 6463 запуски БпЛА типу “Shahed” та інших споріднених засобів, з яких 5833 було перехоплено, що становить понад 90 %. Наведені показники характеризують масштаб повітряних загроз і результативність комплексного застосування засобів протидії, однак не дають змоги окремо визначити внесок кожного компонента системи ППО.

Для протидії ударним і розвідувальним БпЛА застосовують зенітні ракетні комплекси, зенітну артилерію, мобільні вогневі групи, авіацію, засоби радіоелектронної боротьби та спеціалізовані БпЛА-перехоплювачі. Останні становлять окремий перспективний напрям розвитку засобів протиповітряного прикриття завдяки можливості нарощування їх виробництва, автоматизації окремих функцій та потенційному зниженню вартості перехоплення порівняно з використанням певних традиційних засобів ураження. Водночас економічні переваги такого підходу залежать від характеристик повітряних цілей, технічних можливостей перехоплювачів, умов їх застосування та сукупних витрат на функціонування системи.

Застосування окремих БпЛА-перехоплювачів не повністю розв’язує проблему забезпечення необхідної інтенсивності протидії повітряним загрозам. Зі збільшенням кількості одночасно виявлених цілей зростає потреба в засобах перехоплення, ресурсах для управління та координації їхніх дій. Традиційні підходи до індивідуального й групового застосування БпЛА

переважно орієнтовані на виконання конкретного завдання, тоді як забезпечення тривалого прикриття визначеного об'єму повітряного простору потребує підтримання необхідної просторової структури та функціональної готовності засобів перехоплення.

Отже, виникає наукова проблема, пов'язана з обґрунтуванням організації значної кількості БпЛА-перехоплювачів як просторово розподіленого ресурсу безпосереднього протиповітряного прикриття, здатного підтримувати заданий рівень готовності до перехоплення повітряних цілей та відновлювати функціональну структуру після застосування або втрати окремих апаратів. Її розв'язання потребує узгодження процесів просторового розміщення, управління станом елементів, розподілу завдань і підтримання функціональної стійкості системи.

У науковій літературі питання багатоагентного та ройового управління БпЛА, формування груп, кооперативного переслідування, розподілу завдань і підтримання просторового покриття досліджуються як окремі напрями [8–20]. Проте їхня наявність не означає, що проблему функціонального поєднання зазначених процесів у системі безпосереднього протиповітряного прикриття повністю розв'язано. Зокрема, потребує окремого концептуального обґрунтування підхід, за якого БпЛА-перехоплювачі попередньо розгортаються у визначеному об'ємі повітряного простору, підтримують задану просторову структуру, вибірково залучаються до перехоплення та забезпечують подальше відновлення функціонального стану масиву.

Метою статті є обґрунтування концептуальних положень організації безпосереднього протиповітряного прикриття об'єктів і військ на основі попередньо розгорнутого керованого просторового масиву БпЛА-перехоплювачів, визначення його функціональних відмінностей від відомих підходів до індивідуального, групового та ройового застосування БпЛА, формування концептуальної моделі функціонування такого масиву та встановлення основних технологічних обмежень для практичної реалізації запропонованого підходу.

Наукова новизна дослідження полягає в концептуальному обґрунтуванні організації БпЛА-перехоплювачів як попередньо розгорнутого, просторово розподіленого та функціонально відновлюваного ресурсу безпосереднього протиповітряного прикриття. На відміну від підходів, орієнтованих переважно на кооперативне виконання окремого завдання, запропонована концепція передбачає поєднання підтримання заданої просторової структури масиву, вибіркового залучення його елементів до перехоплення повітряних цілей і відновлення функціонального стану після вибуття окремих апаратів. Таке поєднання розглядається як окрема постановка задачі організації протиповітряного прикриття, що потребує подальшої математичної формалізації та перевірки результативності.

Запропонований підхід, умовно визначений як “повітряне мінування”, не заперечує використання відомих методів ройового та багатоагентного управління, а передбачає їхню функціональну інтеграцію для забезпечення тривалого прикриття визначеного об'єму повітряного простору. Його концептуальна відмінність полягає у визначенні просторового масиву БпЛА-перехоплювачів як самостійного об'єкта управління, функціонування якого спрямоване не лише на перехоплення окремої повітряної цілі, а й на збереження необхідного рівня готовності системи до протидії подальшим загрозам.

Огляд літератури

Сучасні наукові дослідження групового та ройового застосування БпЛА охоплюють широкий спектр завдань, пов'язаних із формуванням груп, координацією їхніх дій, розподілом завдань, плануванням траєкторій руху, уникненням зіткнень, організацією інформаційного обміну та забезпеченням навігації в умовах обмеженої доступності супутникових навігаційних систем. Окремим напрямом є дослідження кооперативного перехоплення рухомих повітряних цілей. Результати зазначених досліджень формують теоретичну й технологічну основу для

розроблення перспективних систем протидії БпЛА, однак відрізняються за функціональним призначенням, об'єктами управління та критеріями оцінювання результативності.

Важливе місце в науковій літературі посідають дослідження багатоагентних систем і методів розподіленого управління. Lizzio, Capello та Guglieri систематизували підходи до управління багатоагентними системами БпЛА, зокрема методи підтримання групового польоту та супроводження цілей [8]. Ouyang та співавтори розглянули централізовані, розподілені й децентралізовані підходи до формування та координації груп БпЛА [9]. Подальший розвиток цих положень представлено в дослідженнях методів формування й управління роями, у яких основну увагу приділено забезпеченню узгодженості дій окремих апаратів, збереженню заданої конфігурації групи та адаптації її поведінки до змін зовнішнього середовища [10].

Зазначені дослідження підтверджують наявність теоретичних підходів до координації значної кількості БпЛА та підтримання їхньої просторової організації. Водночас основним предметом таких робіт є управління групою як сукупністю взаємодіючих апаратів, що виконують спільне завдання. Питання використання просторово розподіленої групи як постійного ресурсу безпосереднього протиповітряного прикриття потребує окремого розгляду. Отже, методи багатоагентного управління можуть становити технологічну основу запропонованої концепції, але самі по собі не визначають її функціонального призначення.

Інший напрям досліджень пов’язаний із розподілом і перерозподілом завдань між БпЛА. Skaltsis, Shin та Tsourdos систематизували методи розподілу завдань у багатоапаратних системах, визначивши основні підходи до координації дій окремих елементів [11]. Ві та співавтори розглянули питання динамічного перерозподілу завдань і масштабування алгоритмів управління роями БпЛА [12]. У сучасних дослідженнях також застосовуються методи навчання з підкріпленням для автоматизованого розподілу цілей між апаратами з урахуванням змін умов виконання завдання [13].

Результати цих робіт мають значення для організації взаємодії БпЛА-перехоплювачів, оскільки дають змогу розглядати розподіл завдань як динамічний процес, що враховує стан окремих апаратів і поточні умови застосування. Проте в межах запропонованої концепції розподіл завдань має забезпечувати не лише виконання конкретного перехоплення, а й збереження функціональної спроможності просторового масиву. Це зумовлює необхідність одночасного врахування результативності виконання поточного завдання та загального стану системи прикриття.

Безпосередньо проблематиці кооперативного перехоплення повітряних цілей присвячено дослідження Ji та співавторів, у якому запропоновано підхід до спільного переслідування рухомої цілі кількома БпЛА з формуванням оточення та подальшим зближенням [14]. Sherman та співавтори дослідили застосування рою БпЛА-перехоплювачів для протидії рухомому БпЛА противника, звернувши увагу на необхідність забезпечення міжапаратного інформаційного обміну, координації дій, урахування затримок передавання інформації та уникнення зіткнень [15].

Зазначені результати свідчать про наукове обґрунтування окремих аспектів кооперативного перехоплення. Водночас у таких дослідженнях основним об'єктом управління є процес спільного виконання завдання щодо визначеної повітряної цілі. Натомість у запропонованій концепції “повітряного мінування” первинним об'єктом управління є попередньо сформований просторовий масив БпЛА-перехоплювачів, функціонування якого має забезпечувати готовність до протидії повітряним загрозам незалежно від наявності конкретної цілі в певний момент часу. Відповідно, кооперативне перехоплення розглядається як одна з функцій такої системи, а не як єдина мета її функціонування.

Найближчим за концептуальною логікою до запропонованого підходу є напрям досліджень безперервного просторового покриття, відомий у науковій літературі як

“persistent coverage”. У роботах [16–20] розглядаються підходи до підтримання заданого рівня покриття певної території або просторової області за допомогою груп БпЛА. Зокрема, досліджуються питання зміни просторового положення апаратів, перерозподілу функцій між ними, компенсації вибуття окремих елементів і забезпечення безперервності виконання завдань спостереження, моніторингу або зв'язку.

Принципове значення цих досліджень полягає в тому, що вони підтверджують відомість самої ідеї підтримання просторового покриття за допомогою динамічно організованої групи БпЛА. Отже, попереднє розгортання апаратів у визначеній області, підтримання їхньої просторової конфігурації та компенсація вибуття окремих елементів не можуть самостійно розглядатися як нові наукові результати.

Водночас функціональне призначення просторового покриття в розглянутих роботах переважно пов'язане із забезпеченням спостереження, збору інформації або підтримання зв'язку. У запропонованій концепції просторовий масив формується за допомогою засобів фізичного перехоплення повітряних цілей. Така відмінність змінює постановку задачі, оскільки вона потребує узгодження процесів підтримання просторової структури, вибіркового залучення окремих апаратів до виконання завдань і відновлення функціонального стану системи після їх вибуття. Разом із тим, сама зміна функціонального призначення відомих підходів не є достатнім доказом принципово нового способу протиповітряного прикриття. Вона визначає необхідність подальшого теоретичного обґрунтування та перевірки запропонованої концепції.

Важливою передумовою функціонування багатоапаратних систем є забезпечення безпечної просторової координації. Huang, Teo та Tan систематизували підходи до уникнення зіткнень у групах БпЛА, визначивши основні проблеми координації руху апаратів [21]. У дослідженнях [22; 23] розглядаються методи підтримання групових конфігурацій та уникнення зіткнень з урахуванням динамічних обмежень, перешкод і характеристик інформаційного обміну.

Результати цих робіт свідчать про необхідність розглядати безпечну координацію як окрему функцію управління багатоапаратною системою. Для запропонованого просторового масиву БпЛА-перехоплювачів ця проблема набуває додаткового значення через одночасне виконання різних функціональних процесів: підтримання просторової структури, зміну стану окремих елементів і виконання завдань перехоплення. Відповідно, питання безпеки взаємодії апаратів має враховуватися під час формування концептуальної моделі системи.

Окрему групу становлять дослідження організації інформаційного обміну в багатоапаратних системах. Аналіз архітектури зв'язку роїв БпЛА свідчить, що збільшення кількості апаратів супроводжується зростанням навантаження на комунікаційну інфраструктуру та підвищенням вимог до своєчасності передавання інформації [24]. У роботах [25] розглядаються багатоланкові мережеві архітектури, спрямовані на підвищення стійкості інформаційного обміну та зменшення залежності функціонування групи від окремих каналів зв'язку.

Для концепції “повітряного мінування” інформаційний обмін має забезпечувати не лише координацію дій окремих БпЛА, а й підтримання актуального уявлення про загальний функціональний стан просторового масиву. Це передбачає необхідність узгодження інформації про положення апаратів, їхню готовність, доступність для виконання завдань, а також про зміни просторової структури. Водночас результати наявних досліджень не дають підстав автоматично стверджувати, що відомі мережеві архітектури забезпечуватимуть необхідну масштабованість і стійкість перспективної системи без додаткової перевірки.

Важливим технологічним обмеженням багатоапаратних систем залишається забезпечення навігації та визначення просторового положення в умовах недоступності або деградації сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (Global Navigation Satellite Systems, GNSS). Li та співавтори запропонували підхід до кооперативної навігації БпЛА в умовах недоступності GNSS на основі інформаційної взаємодії між апаратами [26]. Yao та

співавтори досліджували методи геолокації БпЛА за відсутності доступу до супутникової навігації [27]. У сучасних роботах також розглядаються комбіновані підходи, що поєднують GNSS, візуально-інерціальну одометрію (Visual-Inertial Odometry, VIO), надширокосмугове позиціонування (Ultra-Wideband, UWB) та інші методи кооперативного визначення просторового положення [28].

Зазначені дослідження підтверджують наявність альтернативних підходів до позиціонування БпЛА в умовах обмеженої доступності GNSS. Проте їхня застосовність до системи, що передбачає одночасне функціонування значної кількості просторово розподілених апаратів, потребує окремого оцінювання. Особливого значення набувають питання узгодженості просторових даних, своєчасності їх оновлення, масштабованості інформаційного обміну та збереження працездатності системи в умовах несприятливих зовнішніх факторів.

Таким чином, аналіз наукових публікацій [8–28] свідчить, що основні технологічні та методологічні складові запропонованої концепції вже є предметом окремих досліджень. До них належать багатоагентне й ройове управління, формування груп, розподіл завдань, кооперативне перехоплення, безперервне просторове покриття, уникнення зіткнень, організація стійкого інформаційного обміну та навігація в умовах обмеженої доступності GNSS.

Водночас розглянуті напрями відрізняються за основними функціональними завданнями. Дослідження кооперативного перехоплення переважно зосереджені на виконанні завдання щодо конкретної повітряної цілі, тоді як роботи з безперервного просторового покриття орієнтовані переважно на забезпечення спостереження, моніторингу або зв'язку. У межах проаналізованих публікацій недостатньо розкрито питання функціонального поєднання цих підходів для організації попередньо розгорнутого просторового масиву БпЛА-перехоплювачів, який одночасно забезпечує підтримання заданої структури прикриття, вибіркове залучення окремих елементів до виконання завдань і відновлення функціонального стану після їх вибуття.

Отже, невирішена частина наукової проблеми полягає в концептуальному обґрунтуванні такої організації системи безпосереднього протиповітряного прикриття, за якої сукупність БпЛА-перехоплювачів розглядається не лише як група засобів для виконання окремого завдання, а й як просторово розподілений, керований та функціонально відновлюваний ресурс. Саме ця постановка задачі визначає напрям подальшого дослідження та необхідність формування відповідної концептуальної моделі.

Методологія дослідження

Дослідження має теоретико-концептуальний характер і спрямоване на обґрунтування організації безпосереднього протиповітряного прикриття об’єктів і військ на основі попередньо розгорнутого керованого просторового масиву БпЛА-перехоплювачів. Основну увагу приділено визначенню функціональних особливостей запропонованого підходу, формуванню концептуальної моделі його реалізації та визначенню технологічних обмежень. Експериментальну перевірку запропонованої концепції на цьому етапі не проводили.

Інформаційну основу дослідження становлять наукові публікації, присвячені багатоагентному та ройовому управлінню БпЛА, формуванню груп, кооперативному перехопленню повітряних цілей, розподілу завдань, забезпеченню безперервного просторового покриття, уникненню зіткнень, організації інформаційного обміну та навігації в умовах обмеженої доступності глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) [8–28]. Додатково використано оприлюднені технічні характеристики окремих систем несупутникового позиціонування, які розглянуто як технологічні аналоги для визначення обмежень реалізації запропонованої концепції.

Методологічну основу дослідження становить поєднання системного, структурно-функціонального та порівняльного аналізу, декомпозиції функцій, концептуального моделювання й аналізу технологічних вимог.

Системний аналіз використано для визначення місця запропонованого способу в загальній структурі протиповітряного прикриття та розгляду просторового масиву БпЛА-перехоплювачів як єдиного об'єкта управління. При цьому враховано взаємозв'язки між просторовим розміщенням апаратів, їхньою функціональною готовністю, процесами інформаційного обміну, виконанням завдань перехоплення та відновленням структури масиву.

Структурно-функціональний аналіз застосовано для визначення основних функцій перспективної системи та встановлення взаємозв'язків між ними. До таких функцій віднесено формування просторового масиву, контроль стану його елементів, підтримання заданої структури, отримання інформації про повітряні цілі, оцінювання загроз, розподіл завдань, виконання перехоплення, оцінювання результатів і відновлення функціонального стану системи.

Порівняльний аналіз використано для встановлення функціональних відмінностей між індивідуальним, груповим і ройовим застосуванням БпЛА та запропонованою концепцією "повітряного мінування". Порівняння здійснено за такими ознаками: форма організації апаратів, момент формування групи, основне функціональне призначення, характер просторового розміщення, принципи розподілу завдань, поведінка системи після залучення окремих елементів до перехоплення та можливість відновлення просторової структури.

Декомпозицію функцій застосовано для розмежування процесів підтримання просторового масиву та його використання за призначенням. Це дало змогу виокремити два взаємопов'язані функціональні напрями: управління станом і структурою масиву та управління окремими елементами під час виконання завдань перехоплення.

Концептуальне моделювання використано для формування логічної послідовності функціонування системи, визначення її основних елементів і встановлення взаємозв'язків між процесами підтримання просторової структури та протидії повітряним цілям. На відміну від підходу, за якого група БпЛА формується для виконання конкретного завдання після виявлення цілі, у запропонованій концепції просторовий масив створюється заздалегідь і підтримується як постійний функціональний ресурс протиповітряного прикриття.

Аналіз технологічних вимог застосовано для визначення основних обмежень, пов'язаних із позиціонуванням значної кількості БпЛА, інформаційним обміном, координацією їхніх дій та підтриманням функціональної стійкості системи. Для цього використано порівняння характеристик відомих технологічних рішень з орієнтовними потребами запропонованої концепції. Такий підхід дає змогу виявити потенційні технологічні розриви, але не є підставою для підтвердження остаточних технічних вимог до перспективної системи.

Дослідницьку процедуру побудовано як послідовне виконання взаємопов'язаних етапів. На першому етапі систематизовано відомі підходи до групового та ройового застосування БпЛА, кооперативного перехоплення й безперервного просторового покриття. На другому етапі визначено функціональні ознаки запропонованої концепції та порівняно їх із відомими підходами. На третьому етапі сформовано концептуальне представлення просторового масиву БпЛА-перехоплювачів як об'єкта управління. На четвертому етапі визначено основні функціональні процеси та взаємозв'язки між ними. На завершальному етапі проаналізовано технологічні обмеження та визначено напрями подальшої формалізації й перевірки запропонованої концепції.

Для формального представлення просторового масиву позначимо заданий об'єм повітряного простору через Ω, а сукупність БпЛА-перехоплювачів, які входять до складу масиву в момент часу t, через:

$$G(t) = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_{\mathrm{n}}(t)\},$$

де $G(t)$ – множина БпЛА-перехоплювачів, які входять до складу просторового масиву в момент часу t;

$u_i(t)$ – БпЛА-перехоплювач;

$N(t)$ – загальна кількість апаратів у складі масиву в момент часу t.

Для кожного елемента масиву передбачається визначення його просторового положення, функціонального стану, готовності до застосування, доступності для виконання завдання та належності до відповідної ділянки повітряного простору. Сукупність зазначених характеристик формує інформаційну основу для оцінювання стану масиву та ухвалення управлінських рішень.

Одним із початкових показників, що характеризують просторову організацію системи, є середня чисельна щільність готових до застосування БпЛА-перехоплювачів:

$$D(t) = \frac{N_e(t)}{V_\Omega},$$

де $D(t)$ – середня чисельна щільність готових до застосування БпЛА-перехоплювачів у момент часу t;

$N_e(t)$ – кількість апаратів, готових до виконання завдань у заданому об'ємі повітряного простору;

$V\Omega$ – об'єм зони прикриття.

Наведений показник характеризує кількість готових до застосування засобів перехоплення в одиниці об'єму повітряного простору. Водночас він не враховує нерівномірності просторового розподілу апаратів, їхніх індивідуальних характеристик, умов застосування та інших чинників, що можуть впливати на ефективність протиповітряного прикриття. Тому середню чисельну щільність доцільно розглядати як початкову характеристику просторового масиву, а не як самостійний показник ефективності системи.

У межах запропонованої концепції підтримання просторової структури передбачається збереження необхідної функціональної готовності масиву в умовах зміни стану його елементів. Відповідно, основним предметом подальшого математичного моделювання має стати встановлення взаємозв'язків між просторовими характеристиками масиву, станом його елементів і результативністю виконання завдань протиповітряного прикриття.

Запропонований методологічний підхід дає змогу сформувати концептуальну модель функціонування просторового масиву БпЛА-перехоплювачів, визначити його основні функціональні складові та встановити потенційні технологічні обмеження. Водночас отримані результати мають концептуальний характер і не можуть розглядатися як експериментальне підтвердження ефективності або практичної реалізованості запропонованої системи.

Результати дослідження

Концептуальні положення способу "повітряного мінування"

За результатами системного, структурно-функціонального та порівняльного аналізу сформульовано концептуальні положення щодо організації безпосереднього протиповітряного прикриття об'єктів і військ на основі попередньо розгорнутого просторового масиву БпЛА-перехоплювачів.

У межах дослідження запропоновано використовувати поняття "повітряне мінування" для позначення способу організації безпосереднього протиповітряного прикриття, що передбачає попереднє розгортання керованого масиву БпЛА-перехоплювачів у визначеному об'ємі повітряного простору, підтримання його просторової структури та функціональної готовності, вибіркове залучення окремих елементів до перехоплення повітряних цілей і подальше відновлення структури після застосування або вибуття частини апаратів.

Запропоноване визначення відображає функціональне призначення просторового масиву як ресурсу протиповітряного прикриття, який існує до появи конкретної повітряної цілі та підтримується в готовності до виконання завдань за призначенням.

Основними ознаками запропонованої концепції є:

1. **Попереднє розгортання.** Просторовий масив БпЛА-перехоплювачів формується до моменту виявлення конкретної повітряної цілі та підтримується як складова системи протиповітряного прикриття.
2. **Просторова розподіленість.** БпЛА розміщуються у визначеному об’ємі повітряного простору відповідно до заданої структури, а не функціонують виключно як компактна група для виконання окремого завдання.
3. **Підтримання функціональної структури.** Система забезпечує контроль стану елементів масиву та підтримання необхідного рівня його функціональної готовності.
4. **Вибіркове залучення елементів.** Для виконання завдання перехоплення використовується визначена частина масиву, тоді як інші апарати продовжують виконувати функції підтримання просторового прикриття.
5. **Відновлення структури.** Після застосування або вибуття окремих БпЛА передбачається перерозподіл наявних апаратів або залучення резервних засобів для відновлення необхідного функціонального стану масиву.

Сукупність зазначених ознак характеризує “повітряне мінування” як окрему концептуальну форму організації засобів безпосереднього протиповітряного прикриття. Водночас ці ознаки не є принципово новими технологічними рішеннями, оскільки окремо в дослідженнях розглядаються багатоагентне управління, кооперативне застосування БпЛА та безперервне просторове покриття [8–20].

Концептуальна відмінність запропонованого підходу полягає у функціональному поєднанні зазначених процесів для організації просторово розподіленого ресурсу фізичного перехоплення повітряних цілей. Отже, науковий результат на цьому етапі слід розглядати як обґрунтування окремої постановки задачі та формування відповідної концептуальної моделі, а не як підтвердження переваг нового технічного рішення.

Відмінності “повітряного мінування” від індивідуального, групового та ройового застосування БпЛА

Індивідуальне застосування БпЛА-перехоплювача передбачає виконання завдання окремим апаратом, функціонування якого визначається його технічними характеристиками, наявністю інформації про повітряну ціль і можливостями управління.

Групове й ройове застосування ґрунтується на координації дій декількох або значної кількості БпЛА для досягнення спільної мети. Залежно від архітектури системи управління така координація може здійснюватися централізовано, розподілено або децентралізовано. Відомі підходи передбачають формування груп, розподіл завдань, підтримання просторової конфігурації та кооперативне переслідування повітряних цілей [8–15].

Водночас ройове управління характеризується насамперед принципами організації взаємодії між апаратами, тоді як “повітряне мінування” у запропонованому розумінні визначає функціональне призначення та спосіб організації просторового ресурсу протиповітряного прикриття.

Отже, ці поняття не є взаємовиключними. Методи ройового та багатоагентного управління можуть використовуватися для реалізації запропонованої концепції, забезпечуючи координацію елементів масиву, підтримання його структури та виконання окремих функціональних завдань.

Основні відмінності між розглянутими підходами систематизовано в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика індивідуального, ройового та запропонованого способів застосування БпЛА-перехоплювачів

Ознака	**Індивідуальне застосування**	**Ройове / кооперативне застосування**	**“Повітряне мінування”**
Основна форма організації	Окремий БпЛА	Група взаємодіючих БпЛА	Просторово розподілений масив БпЛА
Момент формування	Не передбачає формування групи	Залежить від характеру завдання	До появи конкретної повітряної цілі
Функціональне призначення	Виконання окремого завдання перехоплення	Спільне виконання визначеного завдання	Підтримання готовності просторового ресурсу прикриття
Просторова організація	Положення окремого апарата	Конфігурація відповідно до завдання	Підтримання заданої просторової структури
Розподіл завдань	Управління окремим апаратом	Розподіл між учасниками групи	Вибір елементів із просторового масиву
Поведінка після залучення	Виконання завдання перехоплення	Кооперативне виконання завдання	Вибіркове залучення частини масиву зі збереженням функцій решти
Вибуття апарата	Втрата окремого засобу	Можлива зміна складу або конфігурації групи	Необхідність оцінювання та відновлення функціонального стану масиву
Основний критерій стану	Готовність окремого БпЛА	Готовність групи до виконання завдання	Збереження необхідного рівня функціональної готовності просторового масиву
Роль резерву	Визначається умовами застосування	Залежить від завдання	Передбачається як засіб підтримання та відновлення структури
Характер підходу	Індивідуальне застосування засобу перехоплення	Кооперативна організація виконання завдань	Концептуальна організація просторового ресурсу протиповітряного прикриття

Джерело: систематизовано авторами на основі [8–20].

Наведене порівняння свідчить, що запропонована концепція відрізняється від розглянутих підходів насамперед функціональним призначенням просторової групи та характером підтримання її готовності. Водночас окремі характеристики “повітряного мінування”, зокрема попереднє формування групи, підтримання просторової структури та відновлення її стану, можуть бути властивими й іншим багатоагентним системам.

Тому наведені відмінності слід розглядати як характеристику запропонованої функціональної архітектури, а не як доказ відсутності аналогічних принципів у відомих системах. Подальше підтвердження самостійності концепції потребує встановлення її специфічних властивостей і порівняння її результативності з альтернативними підходами.

Просторова організація “повітряного мінного масиву”

Однією з визначальних характеристик запропонованої концепції є розгляд просторового положення БпЛА-перехоплювачів не лише відносно конкретної повітряної цілі, а й відносно визначеної області протиповітряного прикриття.

У відомих моделях кооперативного перехоплення просторова конфігурація групи може змінюватися залежно від положення та характеру руху цілі. Зокрема, апарати можуть здійснювати спільне зближення, змінювати взаємне положення або формувати визначену конфігурацію для виконання завдання [14; 15].

У запропонованій концепції первинною характеристикою є просторова організація масиву в межах заданого об'єму повітряного простору Ω. При цьому кожний елемент розглядається як складова загальної системи прикриття, функціональний стан якої визначається не лише характеристиками окремих апаратів, а й їхнім взаємним розміщенням і готовністю до виконання завдань.

Для концептуального представлення просторової структури об'єм Ω може бути умовно поділений на окремі просторові елементи або комірки. Такий поділ використовується як спосіб опису організації масиву та не передбачає обов'язкового фізичного закріплення кожного апарата в незмінній позиції.

Просторова структура масиву може змінюватися залежно від стану його елементів, зовнішніх умов і необхідності підтримання функціональної готовності системи. Відповідно, її збереження не слід ототожнювати з підтриманням незмінних координат усіх БпЛА.

У межах запропонованої термінології окремий БпЛА-перехоплювач умовно розглядається як "повітряна міна", оскільки він є елементом попередньо сформованого просторового ресурсу, призначеного для протидії повітряним цілям. Таке визначення має концептуальний характер і не означає повної функціональної чи технічної тотожності БпЛА-перехоплювача традиційним мінним засобам.

На відміну від статичної просторової організації, запропонований масив передбачає можливість зміни положення окремих апаратів і перерозподілу функцій між ними. Його визначальною характеристикою є збереження необхідного функціонального стану системи, а не незмінність просторових координат кожного елемента.

Таким чином, просторова організація "повітряного мінного масиву" розглядається як динамічна структура, функціонування якої спрямоване на підтримання готовності до виконання завдань протиповітряного прикриття. Це створює концептуальну основу для подальшого дослідження взаємозв'язків між характеристиками просторового розподілу БпЛА, станом окремих елементів і загальною функціональною стійкістю системи.

Розподіл завдань між БпЛА-перехоплювачами

Однією з функціональних особливостей запропонованої концепції "повітряного мінування" є розмежування процесів підтримання просторового масиву та залучення його окремих елементів до виконання завдань перехоплення повітряних цілей.

На відміну від підходів, за яких група БпЛА формується переважно для виконання конкретного завдання, запропонована концепція передбачає функціонування попередньо розгорнутого просторового масиву як складової системи протиповітряного прикриття. При цьому виконання завдання окремими апаратами не повинно автоматично призводити до припинення функціонування решти масиву.

У загальному вигляді розподіл завдань передбачає визначення множини БпЛА, доступних для виконання відповідної функції, з урахуванням їхнього поточного стану та належності до просторового масиву.

Для формального представлення цієї множини використано співвідношення:

$$U_t = \{u_i \mid u_i \in G(t),\ C_i(t) = 1\}.$$

де U_t – множина БпЛА, доступних для виконання завдання в момент часу t;

$C_i(t)$ – індикатор доступності *i*-го БпЛА для виконання завдання.

У межах концептуальної моделі значення $C_i(t) = 1$ відповідає стану доступності апарата, а $C_i(t) = 0$ — його недоступності. Конкретні критерії визначення доступності мають встановлюватися під час подальшої математичної формалізації системи.

Зазначене співвідношення визначає лише принцип формування множини доступних елементів і не є завершеним алгоритмом розподілу завдань. Його використання дає змогу

відокремити оцінювання функціонального стану окремих апаратів від процесу ухвалення рішень щодо їхнього залучення.

У запропонованій концепції важливим є також урахування того, що залучення частини БпЛА до виконання окремого завдання змінює функціональний стан просторового масиву. Тому розподіл завдань має розглядатися у взаємозв'язку з підтриманням його загальної готовності та можливістю подальшого відновлення структури.

Отже, принциповою характеристикою запропонованого підходу є розгляд виконання завдання окремими БпЛА як локальної зміни стану просторового масиву. При цьому збереження загальної функціональної спроможності системи є окремим завданням управління.

Відновлення функціональної структури просторового масиву

Важливою складовою концепції "повітряного мінування" є підтримання та відновлення функціонального стану просторового масиву після застосування або вибуття окремих БпЛА-перехоплювачів.

У межах запропонованого підходу вибуття окремого апарата розглядається не лише як зменшення кількості доступних засобів, а й як потенційна зміна просторової організації системи. Відповідно, відновлення масиву передбачає оцінювання його поточного стану та визначення необхідності компенсації змін, спричинених вибуттям окремих елементів.

Для загального опису зміни кількісного складу масиву використано співвідношення:

$$N(t + 1) = N(t) - N_{loss} + N_{reserve}$$

де $N(t)$ – кількість БпЛА у складі масиву на початку розглянутого інтервалу;
$N(t + \Delta t)$ – кількість БпЛА наприкінці інтервалу;
$Nloss(t, \Delta t)$ – кількість апаратів, які вибули зі складу масиву протягом інтервалу;
Nin(t, Δt) – кількість нових апаратів, уведених до складу масиву за цей самий інтервал.

Наведене співвідношення характеризує зміну кількісного складу системи та є балансовою тотожністю. Воно не визначає закономірностей відновлення просторової структури або результативності функціонування масиву.

При цьому необхідно розмежовувати два процеси: зміну кількісного складу масиву та перерозподіл наявних апаратів між його просторовими елементами. Уведення резервних БпЛА збільшує загальну кількість елементів системи, тоді як переміщення апаратів у межах масиву змінює їхнє просторове розташування, але не впливає на загальну чисельність.

Таке розмежування усуває неоднозначність у трактуванні резерву та дає змогу окремо розглядати кількісне й функціональне відновлення системи.

У межах запропонованої концепції відновлення просторової структури не обов'язково передбачається повернення кожного БпЛА до його початкового положення. Визначальним є забезпечення функціонально еквівалентного стану масиву, за якого система зберігає необхідну спроможність виконувати покладені на неї завдання.

Водночас поняття "функціонально еквівалентний стан" потребує подальшого наукового уточнення. Для його формального визначення необхідно встановити відповідні показники та критерії оцінювання стану просторового масиву. У межах цього дослідження зазначене поняття використовується для концептуального опису процесу відновлення системи.

Таким чином, відновлення структури розглядається як окрема функція управління, спрямована на підтримання працездатності просторового масиву в умовах зміни кількісного складу та функціонального стану його елементів.

Концептуальна модель функціонування "повітряного мінного масиву"

За результатами структурно-функціонального аналізу та концептуального моделювання сформовано модель функціонування просторового масиву БпЛА-перехоплювачів як єдиного об'єкта управління.

Запропонована модель передбачає взаємозв'язок процесів формування масиву, контролю його стану, підтримання просторової структури, отримання інформації про повітряні цілі, виконання завдань за призначенням і відновлення функціонального стану після вибуття окремих елементів.

У межах концептуальної моделі виокремлено 8 основних функціональних етапів.

1. **Формування просторового масиву.** Створення попередньо розгорнутої сукупності БпЛА-перехоплювачів у визначеному об'ємі повітряного простору.
2. **Контроль стану елементів.** Отримання та узагальнення інформації про просторове положення, функціональну готовність і доступність апаратів.
3. **Підтримання просторової структури.** Забезпечення узгодженості стану елементів масиву та підтримання його необхідної функціональної організації.
4. **Отримання інформації про повітряну ціль.** Надходження до системи управління інформації від відповідних засобів виявлення та супроводу.
5. **Оцінювання стану та визначення доступних елементів.** Аналіз інформації про стан масиву й визначення апаратів, які можуть бути залучені до виконання завдання.
6. **Виконання завдання перехоплення.** Залучення визначених елементів масиву до виконання завдання за призначенням.
7. **Оцінювання результату.** Отримання інформації про результат виконання завдання та зміну функціонального стану залучених апаратів.
8. **Відновлення функціональної структури.** Оцінювання змін стану масиву після виконання завдання та здійснення процесів його відновлення, передбачених концепцією.

Наведені етапи характеризують основні функції системи, однак не слід розглядати їх виключно як послідовні операції. Зокрема, контроль стану елементів і підтримання просторової структури мають безперервний характер, тоді як процеси отримання інформації про цілі, виконання завдань та оцінювання результатів здійснюються відповідно до поточних умов функціонування системи.

Отже, концептуальна модель передбачає одночасне існування двох взаємопов'язаних функціональних процесів: підтримання готовності просторового масиву та використання його окремих елементів за призначенням.

Загальну логіку взаємозв'язків між основними процесами представлено на рисунку 1.

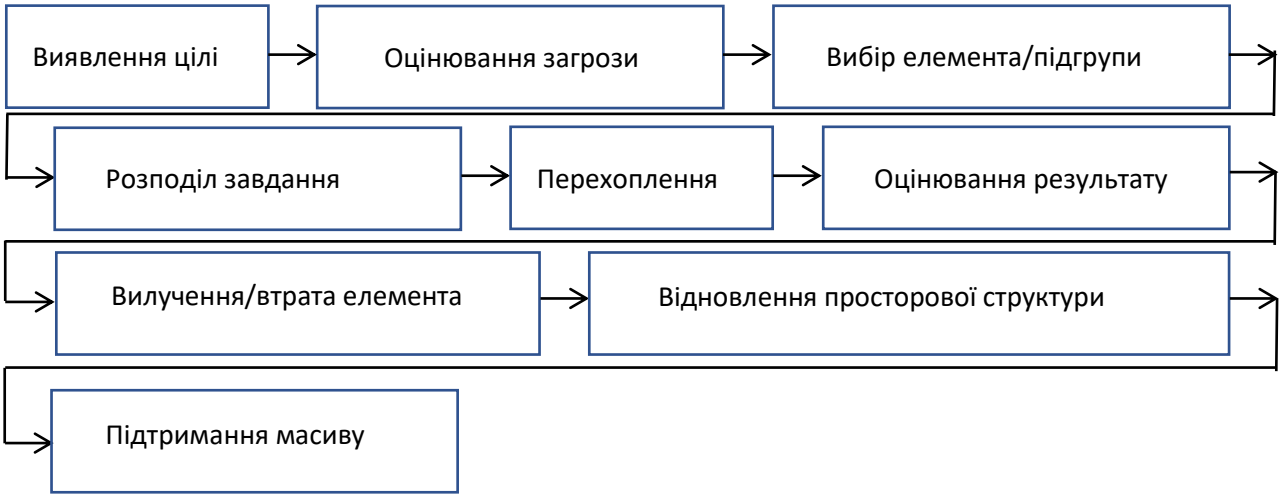


Рисунок 1. Концептуальна модель функціонування "повітряного мінного масиву"

Основним результатом концептуального моделювання є визначення функціональних взаємозв'язків між процесами підтримання просторового масиву, використанням його елементів для виконання завдань та відновленням стану системи після їх вибуття.

Водночас запропонована модель має логіко-функціональний характер. Вона не містить завершених алгоритмів управління, кількісно визначених критеріїв результативності або експериментального підтвердження можливості реалізації зазначених процесів. Її призначення полягає у формуванні теоретичної основи для подальшого математичного та імітаційного моделювання.

Технологічні обмеження реалізації концепції "повітряного мінування"

Реалізація запропонованої концепції "повітряного мінування" пов'язана з необхідністю забезпечення узгодженого функціонування значної кількості просторово розподілених БпЛА-перехоплювачів. На відміну від індивідуального застосування окремого апарата, функціонування такого масиву потребує розв'язання комплексу взаємопов'язаних завдань, що стосуються визначення просторового положення елементів, інформаційного обміну, координації дій, контролю функціонального стану та збереження працездатності системи в несприятливих умовах.

Основними технологічними обмеженнями запропонованої концепції є забезпечення позиціонування значної кількості БпЛА, масштабованість інформаційного обміну, організація управління просторовим масивом, безпечна взаємодія його елементів, стійкість до відмов і втрат окремих апаратів, а також функціонування в умовах обмеженої доступності супутникової навігації та радіоелектронного впливу.

Зазначені обмеження мають системний характер, оскільки зміна характеристик одного компонента може впливати на роботу інших складових. Відповідно, оцінювання технічної реалізованості концепції потребує комплексного підходу, а не лише аналізу характеристик окремих БпЛА.

Аналіз технологій позиціонування

Однією з передумов функціонування просторово розподіленого масиву є наявність достовірної інформації про положення його елементів. Для багатоапаратних систем це питання ускладнюється необхідністю одночасного визначення координат значної кількості БпЛА та підтримання узгодженості просторових даних.

Використання виключно супутникової навігації створює залежність від доступності та достовірності сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). У сучасних дослідженнях для роботи в умовах обмеженої доступності GNSS розглядають методи кооперативного позиціонування, інерціальної навігації, візуально-інерціальної одометрії (VIO), надширокосмугового позиціонування (UWB) та інші підходи [26–28].

В Україні також відомі технологічні рішення несупутникового позиціонування, зокрема SkyLine та SineLink. У межах цього дослідження зазначені системи розглянуто як технологічні аналоги для порівняльного аналізу, а не як готові засоби реалізації запропонованої концепції.

Порівняльні характеристики систем SkyLine та SineLink наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняння характеристик доступних систем позиціонування

Характеристика	SkyLine	SineLink
Максимальна дальність позиціонування	До 50 км	До 120 км
Мертва зона позиціонування	Близько 200 м навколо маяка	Близько 200 м навколо маяка
Частота оновлення координат	Не частіше ніж один раз на 5 с	Близько 2 Гц
Середня горизонтальна точність	200–300 м	Близько 60 м

Характеристика	SkyLine	SineLink
Мінімальна кількість маяків	1 + Master Beacon	3 + Master Beacon
Максимальна кількість маяків	7 + Master Beacon	7 + Master Beacon

Джерело: за характеристиками, наведеними в авторському рукописі. Показники потребують перевірки відповідно до актуальної технічної документації виробників.

Наведені характеристики стосуються конкретних реалізацій систем і не можуть безпосередньо переноситися на перспективний просторовий масив БпЛА-перехоплювачів.

SkyLine LRS використовує наземні маяки з відомими координатами та послідовно вимірює відстань до них. Визначення просторового положення здійснюється на основі отриманих вимірювань. SineLink використовує подібний загальний принцип мультилатерації, але відрізняється технічними характеристиками та організацією обміну інформацією.

Для багатоапаратних систем важливим є не лише значення похибки визначення координат окремого БпЛА, а й можливість підтримання необхідної актуальності просторових даних для всієї сукупності апаратів. За послідовної організації вимірювань збільшення кількості обслуговуваних об'єктів може супроводжуватися зростанням інформаційного навантаження та зменшенням доступної частоти оновлення координат. Водночас характер цієї залежності визначається конкретною архітектурою системи та не може бути встановлений лише на основі даних таблиці 2.

Отже, аналіз розглянутих технологій підтверджує наявність окремих технічних передумов для несупутникового позиціонування БпЛА. Проте наведені характеристики не дають підстав стверджувати, що зазначені системи здатні забезпечити всі функціональні потреби запропонованого просторового масиву.

Методологічні обмеження визначення вимог до позиціонування

Важливим питанням дослідження є обґрунтованість вимог до точності позиціонування та частоти оновлення інформації. У вихідному рукописі наведено орієнтовні значення точності 5–20 м і частоти оновлення 2–10 Гц.

Зазначені величини доцільно розглядати як попередні дослідницькі припущення, а не як установлені технічні вимоги. Для їх обґрунтування необхідно враховувати характер виконуваних функцій, динамічні властивості апаратів, допустимі похибки та затримки інформаційного обміну.

У загальному випадку просторово-часова невизначеність може формуватися внаслідок похибок визначення положення окремих об'єктів і зміни їхнього положення протягом інтервалу між оновленнями інформації.

У вихідному рукописі для ілюстрації цього взаємозв'язку використано співвідношення:

$$\varepsilon_\Sigma \geq \varepsilon_p + \varepsilon_t + v_r \Delta t$$

де ε_Σ – допустима сумарна просторово-часова похибка;
ε_p – похибка позиціонування БпЛА;
ε_t – похибка визначення положення повітряної цілі;
v_r – відносна швидкість зближення;
Δt – інтервал між оновленнями інформації.

Це співвідношення має характер спрощеної оцінки верхньої межі можливих складових похибок. Воно не є повною стохастичною моделлю точності позиціонування та не враховує статистичних залежностей між похибками, характеристиками системи керування та іншими чинниками.

За умови додатного залишкового бюджету похибки наведене співвідношення дає змогу формально визначити обмеження на інтервал оновлення інформації:

$$\Delta t \leq \frac{\varepsilon_\Sigma - \varepsilon_p - \varepsilon_t}{v_r}$$

Відповідно, частота оновлення інформації може бути представлена як:

$$f \geq \frac{v_r}{\varepsilon_\Sigma - \varepsilon_p - \varepsilon_t}$$

Наведені співвідношення демонструють залежність допустимого інтервалу оновлення інформації від прийнятого бюджету похибки та швидкості зміни взаємного просторового положення об’єктів. Водночас вони справедливі лише в межах прийнятих спрощених припущень.

Таким чином, наведені в рукописі орієнтовні значення точності й частоти оновлення не слід трактувати як універсальні нормативні параметри. Їх уточнення потребує окремого дослідження з використанням математичного та імітаційного моделювання.

Системне управління просторовим масивом

Запропонована концепція передбачає необхідність розмежування двох функціонально пов'язаних напрямів управління: підтримання стану просторового масиву та забезпечення виконання окремими БпЛА завдань за призначенням.

Перший напрям охоплює отримання інформації про стан елементів, контроль доступності апаратів, оцінювання змін просторової структури та підтримання загальної функціональної готовності системи.

Другий напрям пов'язаний з обробленням інформації про поточні завдання, визначенням доступних елементів масиву, контролем їхнього функціонального стану після застосування та оновленням інформації про стан системи загалом.

Розмежування зазначених напрямів має концептуальне значення, оскільки дає змогу розглядати підтримання просторового масиву як постійну функцію системи, а виконання окремих завдань — як процес, що змінює її поточний стан.

Водночас вибір конкретної архітектури управління, зокрема централізованої, розподіленої або децентралізованої, потребує додаткового обґрунтування. У межах цього дослідження не встановлено переваг жодної з таких архітектур для запропонованої концепції.

Інформаційний обмін і масштабованість

Функціонування просторово розподіленого масиву передбачає інформаційну взаємодію між його елементами та відповідними компонентами системи управління. Обсяг і характер необхідного інформаційного обміну залежать від кількості апаратів, їхнього функціонального стану, структури системи та прийнятих принципів управління.

Збільшення кількості БпЛА може супроводжуватися зростанням навантаження на комунікаційну інфраструктуру, особливо за умов необхідності регулярного оновлення інформації про стан кожного елемента.

Водночас масштабованість системи не визначається виключно кількістю апаратів. Вона також залежить від організації інформаційного обміну, обсягів переданих даних, архітектури управління та можливостей обробки інформації.

Отже, інформаційний обмін слід розглядати як окрему складову оцінювання технічної реалізованості запропонованої концепції. На цьому етапі дослідження кількісні характеристики необхідної пропускної спроможності, допустимих затримок та інформаційного навантаження не визначено.

Безпека взаємодії та функціональна стійкість системи

Застосування значної кількості БпЛА в обмеженому об'ємі повітряного простору потребує врахування питань безпечної просторової взаємодії, надійності інформаційного обміну та збереження працездатності системи в умовах відмов окремих елементів.

У дослідженнях багатоагентних систем зазначені питання розглядаються в межах проблематики уникнення зіткнень, підтримання групових конфігурацій і забезпечення стійкості управління [21–25].

Для запропонованої концепції особливого значення набуває розмежування надійності окремого БпЛА та функціональної стійкості просторового масиву загалом. Відмова окремого елемента не обов'язково означає втрату працездатності всієї системи, однак її наслідки залежать від просторового положення апарата, функціональної ролі та наявності можливостей компенсації змін стану масиву.

Тому функціональна стійкість має розглядатися як властивість системи зберігати необхідну спроможність виконувати визначені функції за умов зміни складу та стану її елементів.

У межах цього дослідження зазначену властивість визначено на концептуальному рівні. Її кількісне оцінювання потребує встановлення відповідних критеріїв і проведення окремих досліджень.

Узагальнення технологічних обмежень

Проведений аналіз свідчить, що реалізація концепції “повітряного мінування” залежить від узгодженого розв’язання низки технологічних проблем. До них належать позиціонування значної кількості апаратів, забезпечення актуальності просторової інформації, масштабованість інформаційного обміну, організація управління, безпечна координація та підтримання функціональної стійкості системи.

Порівняння характеристик SkyLine та SineLink із попередньо визначеними дослідницькими орієнтирами вказує на відмінність між можливостями розглянутих технологічних рішень і потребами, які можуть виникнути під час реалізації запропонованої концепції.

Водночас величину такого технологічного розриву не можна вважати остаточно встановленою, оскільки кількісні вимоги до перспективної системи ще не обґрунтовано на основі завершеної математичної моделі.

Отже, отримані результати дають змогу визначити основні напрями подальших досліджень, але не підтверджують технічної реалізованості запропонованого способу протиповітряного прикриття.

Обговорення

Результати проведеного дослідження дають підстави розглядати “повітряне мінування” як концептуальний підхід до організації безпосереднього протиповітряного прикриття об’єктів і військ на основі попередньо розгорнутого просторового масиву БпЛА-перехоплювачів. Його основна особливість полягає в перенесенні уваги з виконання окремого завдання перехоплення на підтримання функціональної готовності просторово розподіленої сукупності засобів, здатних залучатися до протидії повітряним загрозам.

На відміну від індивідуального застосування БпЛА-перехоплювачів, за якого основним об’єктом управління є окремий апарат, запропонована концепція передбачає розгляд сукупності апаратів як єдиного функціонального ресурсу. При цьому результативність системи потенційно залежить не лише від характеристик кожного БпЛА, а й від просторової організації масиву, доступності його елементів, можливостей інформаційного обміну та здатності підтримувати необхідний функціональний стан.

Порівняння запропонованого підходу з результатами досліджень багатоагентного й ройового управління [8–13] свідчить про наявність спільних теоретичних положень. Зокрема, відомі методи формування груп, розподілу завдань, координації дій та підтримання просторової структури можуть бути використані як методологічна основа для подальшого дослідження запропонованої концепції. Водночас функціональне призначення “повітряного мінування” відрізняється від підходів, орієнтованих переважно на організацію взаємодії

апаратів для виконання визначеного завдання. У запропонованій концепції підтримання готовності просторового масиву розглядається як самостійна функція, що здійснюється незалежно від наявності конкретної повітряної цілі.

Результати досліджень кооперативного перехоплення [14; 15] підтверджують можливість теоретичного розгляду узгодженого застосування кількох БпЛА для виконання завдань щодо рухомих повітряних цілей. Проте такі дослідження переважно зосереджені на координації дій апаратів під час виконання конкретного завдання. У межах запропонованого підходу кооперативне перехоплення є лише однією з функцій просторового масиву, тоді як підтримання його загальної готовності та відновлення після вибуття окремих елементів розглядаються як окремі взаємопов'язані процеси.

Найближчими за змістом до запропонованої концепції є дослідження безперервного просторового покриття ("persistent coverage") [16–20]. У цих роботах розглядаються питання підтримання заданого рівня покриття певної області, зміни просторової конфігурації групи та компенсації вибуття окремих елементів. Це свідчить про те, що принципи попереднього розгортання, підтримання просторової структури та її відновлення вже відомі в теорії багатоагентних систем.

Водночас зазначені дослідження переважно спрямовані на виконання завдань спостереження, моніторингу або забезпечення зв'язку. У запропонованій концепції просторовий масив формується із засобів фізичного перехоплення повітряних цілей. Така зміна функціонального призначення зумовлює необхідність одночасного розгляду двох процесів: підтримання готовності просторового ресурсу та використання його окремих елементів за призначенням.

Саме взаємозв'язок зазначених процесів є основним предметом запропонованої концептуальної моделі. При цьому використання відомих принципів багатоагентного управління в іншій предметній області не може автоматично вважатися доказом наукової новизни. Для підтвердження самостійності запропонованого підходу необхідно встановити його специфічні функціональні властивості та визначити умови, за яких він може забезпечувати переваги порівняно з альтернативними способами організації протиповітряного прикриття.

Одним із результатів дослідження є формування концептуального представлення просторового масиву БпЛА-перехоплювачів як єдиного об'єкта управління. На відміну від підходу, за якого оцінюється переважно готовність окремого апарата або групи до виконання конкретного завдання, запропонована модель передбачає необхідність оцінювати функціональний стан системи загалом.

Це положення має методологічне значення, оскільки дає змогу розмежувати кількісні характеристики масиву та його функціональну спроможність. Зокрема, запропонований показник середньої чисельної щільності БпЛА характеризує кількість готових до застосування апаратів в одиниці об'єму повітряного простору, але не визначає безпосередньо ефективності протиповітряного прикриття.

Однакова чисельна щільність може відповідати різним просторовим конфігураціям і різним функціональним станам системи. Відповідно, використання цього показника як самостійного критерію ефективності було б методологічно необґрунтованим. Його доцільно розглядати як одну з початкових характеристик, які можуть використовуватися під час подальшого формування комплексної моделі оцінювання.

Аналогічного уточнення потребує питання відновлення просторового масиву. Запропоновані балансові співвідношення зміни кількості БпЛА відображають процес вибуття та поповнення елементів системи, але не характеризують безпосередньо відновлення її функціональної спроможності. Зміна кількісного складу й перерозподіл наявних апаратів можуть мати різні наслідки для просторової організації масиву. Тому подальше дослідження

потребує встановлення критеріїв, які дають змогу оцінювати не лише кількість апаратів, а й збереження здатності системи виконувати визначені функції.

Окреме значення мають результати аналізу технологічних обмежень. Дослідження засвідчило, що практична реалізація запропонованої концепції пов’язана з необхідністю забезпечення позиціонування значної кількості БпЛА, масштабованого інформаційного обміну, безпечної просторової координації та функціонування в умовах обмеженої доступності GNSS. Зазначені проблеми розглядаються в сучасних дослідженнях багатоагентних систем [21–28], однак їх комплексне розв’язання для запропонованого способу потребує окремого наукового обґрунтування.

Порівняльний аналіз характеристик SkyLine та SineLink показав, що розглянуті технологічні рішення мають обмеження щодо точності позиціонування та частоти оновлення координат. Водночас отримані результати не дають підстав для категоричного висновку про непридатність зазначених систем або неможливість реалізації запропонованої концепції. Насамперед це пов’язано з тим, що кількісні вимоги до перспективного просторового масиву ще не встановлено на основі завершеної математичної моделі.

Наведені в дослідженні орієнтовні значення точності позиціонування та частоти оновлення інформації є попередніми оцінками. Використані математичні співвідношення демонструють загальну залежність між допустимою просторово-часовою похибкою та актуальністю інформації, однак не враховують повного комплексу чинників, що визначають роботу реальної системи. Тому зазначені залежності можуть використовуватися як вихідні положення для подальших досліджень, але не як завершене обґрунтування технічних вимог.

Суттєвим аспектом є також функціональна стійкість запропонованого просторового масиву. У межах концепції передбачається, що вибуття окремих БпЛА не обов’язково призводить до загальної втрати працездатності системи. Проте це положення залишається теоретичним припущенням, оскільки в дослідженні не встановлено кількісних критеріїв функціональної стійкості та не проведено моделювання наслідків втрати окремих елементів.

Таким чином, запропонована концепція дає змогу сформулювати окрему наукову задачу, пов’язану з визначенням умов збереження функціональної спроможності просторового масиву за зміни його кількісного складу та просторової організації. Її розв’язання потребує подальшого математичного моделювання, встановлення критеріїв оцінювання та перевірки отриманих результатів.

Наукова новизна дослідження полягає в концептуальному обґрунтуванні організації БпЛА-перехоплювачів як попередньо розгорнутого, просторово розподіленого та функціонально відновлюваного ресурсу безпосереднього протиповітряного прикриття. На відміну від підходів, орієнтованих переважно на кооперативне виконання окремого завдання, запропонована концепція передбачає функціональне поєднання підтримання просторової структури масиву, вибіркового залучення його елементів до виконання завдань і відновлення функціонального стану системи.

Водночас наукова новизна на цьому етапі обмежується концептуальною постановкою задачі та формуванням відповідної логіко-функціональної моделі. У дослідженні не отримано експериментального підтвердження ефективності запропонованого способу, не встановлено оптимальних параметрів просторового масиву та не доведено його переваг порівняно з відомими підходами.

Практичне значення результатів полягає у формуванні теоретичної основи для подальшого дослідження перспективних систем безпосереднього протиповітряного прикриття. Запропонована концепція може бути використана для визначення функціональної структури системи, обґрунтування показників її стану, формування вимог до інформаційного забезпечення та розроблення методичних підходів до оцінювання функціональної стійкості.

Разом із тим практичне значення отриманих результатів має потенційний характер. Без математичної формалізації, моделювання та експериментальної перевірки неможливо зробити обґрунтований висновок щодо технічної реалізованості, результативності або економічної доцільності запропонованого способу.

Основні обмеження дослідження зумовлені його теоретико-концептуальним характером. Зокрема, не визначено оптимальної кількості БпЛА у складі масиву та геометрії їхнього просторового розміщення; не встановлено кількісної залежності між характеристиками масиву й результативністю прикриття; не підтверджено можливості забезпечення необхідної точності позиціонування за одночасного функціонування значної кількості апаратів; не оцінено стійкості системи до радіоелектронного впливу та відмов окремих елементів; не проведено порівняльного оцінювання економічної ефективності.

Зазначені обмеження визначають напрями подальших досліджень. Насамперед необхідно розробити математичну модель просторового масиву, визначити систему показників його функціонального стану та сформувати критерії оцінювання результативності. Наступним етапом має стати імітаційне моделювання, спрямоване на перевірку сформульованих концептуальних положень, дослідження впливу основних параметрів на функціонування системи та встановлення меж застосовності запропонованого підходу.

Подальші дослідження також мають передбачати оцінювання функціональної стійкості, інформаційної надійності, технологічних обмежень і економічної доцільності. Лише після отримання відповідних результатів можна буде перейти від концептуального обґрунтування до висновків щодо практичної реалізованості запропонованого способу.

Отже, проведене дослідження не доводить переваг “повітряного мінування” над відомими способами протиповітряного прикриття, але формує концептуальну основу для системного дослідження цього підходу. Його основний науковий результат полягає в постановці задачі організації просторового масиву БпЛА-перехоплювачів як єдиного функціонального ресурсу, стан якого визначається взаємозв’язком просторової організації, готовності окремих елементів, їх використання та відновлення системи загалом.

Висновки

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано концептуальні положення організації безпосереднього протиповітряного прикриття об’єктів і військ на основі попередньо розгорнутого просторового масиву БпЛА-перехоплювачів. Запропоновано розглядати “повітряне мінування” як спосіб організації просторово розподіленого ресурсу протиповітряного прикриття, що передбачає підтримання функціональної готовності масиву, вибіркове залучення його елементів до виконання завдань та відновлення структури після застосування або вибуття окремих апаратів.

На основі порівняльного аналізу встановлено, що запропонована концепція відрізняється від індивідуального, групового та ройового застосування БпЛА насамперед функціональним призначенням просторового масиву. На відміну від підходів, орієнтованих переважно на виконання окремого завдання, у межах запропонованої концепції підтримання готовності просторово розподіленої сукупності засобів перехоплення розглядається як самостійна функція системи. Водночас визначено, що окремі принципи організації такого масиву ґрунтуються на відомих положеннях багатоагентного управління, кооперативного перехоплення та безперервного просторового покриття.

За результатами структурно-функціонального аналізу сформовано концептуальну модель функціонування просторового масиву БпЛА-перехоплювачів, яка відображає взаємозв’язки між процесами підтримання просторової структури, контролю стану елементів, виконання завдань за призначенням та відновлення функціональної готовності системи. Запропонована модель дає змогу розглядати масив як єдиний об’єкт управління,

функціонування якого визначається не лише кількістю апаратів, а й їхнім просторовим розподілом і поточним станом.

Уточнено методологічні підходи до формального представлення просторового масиву. Показано, що середня чисельна щільність БпЛА характеризує кількість готових до застосування апаратів в одиниці об'єму повітряного простору, але не може самостійно використовуватися як показник ефективності протиповітряного прикриття. Також розмежовано зміну кількісного складу масиву та відновлення його функціонального стану, що створює передумови для подальшого формування системи показників і критеріїв оцінювання.

Визначено основні технологічні обмеження реалізації запропонованої концепції, пов'язані з позиціонуванням значної кількості БпЛА, масштабованістю інформаційного обміну, координацією дій, безпекою просторової взаємодії та функціональною стійкістю системи. Порівняльний аналіз характеристик SkyLine та SineLink засвідчив наявність обмежень розглянутих технологічних рішень щодо точності позиціонування та частоти оновлення координат. Водночас остаточне визначення вимог до перспективної системи потребує подальшого математичного обґрунтування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в концептуальному обґрунтуванні організації БпЛА-перехоплювачів як попередньо розгорнутого, просторово розподіленого та функціонально відновлюваного ресурсу безпосереднього протиповітряного прикриття. Запропонований підхід поєднує підтримання готовності просторового масиву, використання його окремих елементів за призначенням і відновлення функціонального стану системи в межах єдиної логіко-функціональної моделі.

Отримані результати мають теоретико-концептуальний характер. У межах дослідження не встановлено оптимальних параметрів просторового масиву, не визначено кількісної залежності між його характеристиками та результативністю прикриття, а також не проведено експериментальної перевірки запропонованої концепції. Тому наведені положення не можуть розглядатися як підтвердження технічної реалізованості або переваг запропонованого способу над відомими підходами.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на математичну формалізацію концепції, визначення показників функціонального стану просторового масиву, розроблення критеріїв оцінювання його результативності та проведення моделювання за допомогою імітації. Окремої уваги потребують оцінювання функціональної стійкості, технологічних обмежень, безпеки застосування та економічної доцільності запропонованого підходу.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів.

Використання штучного інтелекту

Мовне редагування, переклад, технічна перевірка тексту.

Список використаних джерел:

Список використаних джерел

1. Watling J., Bronk J. Protecting the Force from Uncrewed Aerial Systems. Royal United Services Institute. 2024. 15 October. URL: https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/occasional-papers/protecting-force-uncrewed-aerial-systems (дата звернення: 29.8.2026).

2. Jensen B., Atalan Y. Drone Saturation: Russia's Shahed Campaign. Center for Strategic and International Studies. 2025. 13 May. URL: https://www.csis.org/analysis/drone-saturation-russias-shahed-campaign (дата звернення: 29.8.2026).
3. Наймасштабніша денна атака в історії: ППО збила понад 94 % цілей. Міністерство оборони України. 2026. 25 березня. URL: https://mod.gov.ua/news/najmasshtabnisha-denna-ataka-v-istoriyi-ppo-zbila-ponad-94-czilej (дата звернення: 29.8.2026).
4. ППО у березні перехопила понад 90 % ворожих дронів. Міністерство оборони України. 2026. 3 квітня. URL: https://mod.gov.ua/news/ukrainska-ppo-u-berezni-perekhopyla-ponad-90-droniv (дата звернення: 29.8.2026).
5. Xing L., Cui C., Wang M., Xu C. From Detection to Countermeasure: A Review of Key Technologies in Counter-Unmanned Aerial Vehicle Systems. *IET Cyber-Systems and Robotics*. 2026. Vol. 8, No. 1. Article e70048. DOI: https://doi.org/10.1049/csy2.70048.
6. Dafrallah S., Akhloufi M. A. Malicious UAV detection using various modalities. *Drone Systems and Applications*. 2024. Vol. 12. P. 1–18. DOI: https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0049.
7. Dobija K. Countering Unmanned Aerial Systems (UAS) in Military Operations. *Safety & Defense*. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 74–82. DOI: https://doi.org/10.37105/sd.195.
8. Lizzio F. F., Capello E., Guglieri G. A Review of Consensus-based Multi-agent UAV Implementations. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2022. Vol. 106. Article 43. DOI: https://doi.org/10.1007/s10846-022-01743-9.
9. Ouyang Q., Wu Z., Cong Y., Wang Z. Formation Control of Unmanned Aerial Vehicle Swarms: A Comprehensive Review. *Asian Journal of Control*. 2023. Vol. 25. P. 570–593. DOI: https://doi.org/10.1002/asjc.2806.
10. Bu Y., Yan Y., Yang Y. Advancement Challenges in UAV Swarm Formation Control: A Comprehensive Review. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 7. Article 320. DOI: https://doi.org/10.3390/drones8070320.
11. Skaltsis G. M., Shin H.-S., Tsourdos A. A Review of Task Allocation Methods for UAVs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2023. Vol. 109. Article 76. DOI: https://doi.org/10.1007/s10846-023-02011-0.
12. Bi W., Zhang M., Gao F., Yang M., Zhang A. Review on UAV swarm task allocation technology. *Systems Engineering and Electronics*. 2024. Vol. 46, No. 3. P. 922–934. DOI: https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2024.03.18.
13. Ding Y., Kuang M., Shi H., Gao J. Multi-UAV Cooperative Target Assignment Method Based on Reinforcement Learning. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 10. Article 562. DOI: https://doi.org/10.3390/drones8100562.
14. Ji M., Xu G., Duan Z., Wang L., Li Z., Ge J. et al. Cooperative pursuit with multiple pursuers based on Deep Minimax Q-learning. *Aerospace Science and Technology*. 2024. Vol. 146. Article 108919. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.108919.
15. Sherman M., Shao S., Sun X., Zheng J. Counter UAV Swarms: Challenges, Considerations, and Future Directions in UAV Warfare. *IEEE Wireless Communications*. 2025. Vol. 32, No. 1. P. 190–196. DOI: https://doi.org/10.1109/MWC.003.2400047.
16. Jing T., Wang W., Wang T., Li X., Zhou X. Dynamic Control Scheme of Multiswarm Persistent Surveillance in a Changing Environment. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2019. Article 6025657. DOI: https://doi.org/10.1155/2019/6025657.
17. Cho J., Sung J., Yoon J., Lee H. Towards persistent surveillance and reconnaissance using a connected swarm of multiple UAVs. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 157906–157917. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019963.
18. Persistent coverage of UAVs based on deep reinforcement learning with wonderful life utility. *Neurocomputing*. 2023. Vol. 521. P. 137–145. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.11.091.

19. Feng L., Katupitiya J. UAV-based persistent full area coverage with dynamic priorities. *Robotics and Autonomous Systems*. 2022. Vol. 157. Article 104244. DOI: https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104244.
20. Thummalapeta M., Chen S.-W., Liu Y.-C. Importance-based distributed persistent coverage strategy over environmental hotspots using quadrotors: Algorithm and experiments. *Journal of the Franklin Institute*. 2024. Vol. 361, No. 2. P. 994–1009. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016003223008116 (дата звернення: 29.8.2026).
21. Huang S., Teo R. S. H., Tan K. K. Collision avoidance of multi unmanned aerial vehicles: A review. *Annual Reviews in Control*. 2019. Vol. 48. P. 147–164. DOI: https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.10.001.
22. He Y., Shi X., Lu J., Zhao C., Zhao G. Grouping Formation and Obstacle Avoidance Control of UAV Swarm Based on Synchronous DMPC. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2024. Article 4934194. DOI: https://doi.org/10.1155/2024/4934194.
23. Han L., Wang Y., Yan Z., Li X., Ren Z. Event-triggered formation control with obstacle avoidance for multi-agent systems applied to multi-UAV formation flying. *Control Engineering Practice*. 2024. Vol. 153. Article 106105. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.106105.
24. Chen X., Tang J., Lao S. Review of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Communication Architectures and Routing Protocols. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 10. Article 3661. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/10/10/3661 (дата звернення: 29.8.2026).
25. Clerigues D., Wubben J., Calafate C. T., Cano J.-C., Manzoni P. Enabling resilient UAV swarms through multi-hop wireless communications. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2024. Article 39. DOI: https://doi.org/10.1186/s13638-024-02373-5.
26. Li J., Yang G., Cai Q., Niu H., Li J. Cooperative navigation for UAVs in GNSS-denied area based on optimized belief propagation. *Measurement*. 2022. Vol. 192. Article 110797. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224122000975 (дата звернення: 29.8.2026).
27. Yao F., Lan C., Wang L., Wan H., Gao T., Wei Z. GNSS-denied geolocalization of UAVs using terrain-weighted constraint optimization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024. Vol. 135. Article 104277. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104277.
28. Akhihiero D., Olawoye U., Das S., Gross J. N. Cooperative Localization for GNSS-Denied Subterranean Navigation: A UAV–UGV Team Approach. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*. 2024. Vol. 71, No. 4. DOI: https://doi.org/10.33012/navi.677.

References

1. Watling, J., & Bronk, J. (2024, October 15). *Protecting the force from uncrewed aerial systems*. Royal United Services Institute. https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/occasional-papers/protecting-force-uncrewed-aerial-systems
2. Jensen, B., & Atalan, Y. (2025, May 13). *Drone saturation: Russia's Shahed campaign*. Center for Strategic and International Studies. https://www.csis.org/analysis/drone-saturation-russias-shahed-campaign
3. Ministry of Defence of Ukraine. (2026, March 25). *Naimasshtabnisha denna ataka v istorii: PPO zbyla ponad 94 % tsilei* [The largest daytime attack in history: Air defence intercepted over 94% of targets]. https://mod.gov.ua/news/najmasshtabnisha-denna-ataka-v-istoriyi-ppo-zbila-ponad-94-czilej
4. Ministry of Defence of Ukraine. (2026, April 3). *PPO u berezni perekhopyla ponad 90 % vorozhykh droniv* [Air defence intercepted over 90% of enemy drones in March]. https://mod.gov.ua/news/ukrainska-ppo-u-berezni-perekhopyla-ponad-90-droniv

5. Xing, L., Cui, C., Wang, M., & Xu, C. (2026). From detection to countermeasure: A review of key technologies in counter-unmanned aerial vehicle systems. *IET Cyber-Systems and Robotics, 8*(1), Article e70048. https://doi.org/10.1049/csy2.70048
6. Dafrallah, S., & Akhloufi, M. A. (2024). Malicious UAV detection using various modalities. *Drone Systems and Applications, 12*, 1–18. https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0049
7. Dobija, K. (2023). Countering unmanned aerial systems (UAS) in military operations. *Safety & Defense, 9*(1), 74–82. https://doi.org/10.37105/sd.195
8. Lizzio, F. F., Capello, E., & Guglieri, G. (2022). A review of consensus-based multi-agent UAV implementations. *Journal of Intelligent & Robotic Systems, 106*, Article 43. https://doi.org/10.1007/s10846-022-01743-9
9. Ouyang, Q., Wu, Z., Cong, Y., & Wang, Z. (2023). Formation control of unmanned aerial vehicle swarms: A comprehensive review. *Asian Journal of Control, 25*, 570–593. https://doi.org/10.1002/asjc.2806
10. Bu, Y., Yan, Y., & Yang, Y. (2024). Advancement challenges in UAV swarm formation control: A comprehensive review. *Drones, 8*(7), Article 320. https://doi.org/10.3390/drones8070320
11. Skaltsis, G. M., Shin, H.-S., & Tsourdos, A. (2023). A review of task allocation methods for UAVs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems, 109*, Article 76. https://doi.org/10.1007/s10846-023-02011-0
12. Bi, W., Zhang, M., Gao, F., Yang, M., & Zhang, A. (2024). Review on UAV swarm task allocation technology. *Systems Engineering and Electronics, 46*(3), 922–934. https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2024.03.18
13. Ding, Y., Kuang, M., Shi, H., & Gao, J. (2024). Multi-UAV cooperative target assignment method based on reinforcement learning. *Drones, 8*(10), Article 562. https://doi.org/10.3390/drones8100562
14. Ji, M., Xu, G., Duan, Z., Wang, L., Li, Z., Ge, J., et al. (2024). Cooperative pursuit with multiple pursuers based on deep minimax Q-learning. *Aerospace Science and Technology, 146*, Article 108919. https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.108919
15. Sherman, M., Shao, S., Sun, X., & Zheng, J. (2025). Counter UAV swarms: Challenges, considerations, and future directions in UAV warfare. *IEEE Wireless Communications, 32*(1), 190–196. https://doi.org/10.1109/MWC.003.2400047
16. Jing, T., Wang, W., Wang, T., Li, X., & Zhou, X. (2019). Dynamic control scheme of multiswarm persistent surveillance in a changing environment. *Computational Intelligence and Neuroscience, 2019*, Article 6025657. https://doi.org/10.1155/2019/6025657
17. Cho, J., Sung, J., Yoon, J., & Lee, H. (2020). Towards persistent surveillance and reconnaissance using a connected swarm of multiple UAVs. *IEEE Access, 8*, 157906–157917. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019963
18. Persistent coverage of UAVs based on deep reinforcement learning with wonderful life utility. (2023). *Neurocomputing, 521*, 137–145. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.11.091
19. Feng, L., & Katupitiya, J. (2022). UAV-based persistent full area coverage with dynamic priorities. *Robotics and Autonomous Systems, 157*, Article 104244. https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104244
20. Thummalapeta, M., Chen, S.-W., & Liu, Y.-C. (2024). Importance-based distributed persistent coverage strategy over environmental hotspots using quadrotors: Algorithm and experiments. *Journal of the Franklin Institute, 361*(2), 994–1009. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016003223008116
21. Huang, S., Teo, R. S. H., & Tan, K. K. (2019). Collision avoidance of multi unmanned aerial vehicles: A review. *Annual Reviews in Control, 48*, 147–164. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.10.001

22. He, Y., Shi, X., Lu, J., Zhao, C., & Zhao, G. (2024). Grouping formation and obstacle avoidance control of UAV swarm based on synchronous DMPC. *International Journal of Aerospace Engineering, 2024*, Article 4934194. https://doi.org/10.1155/2024/4934194
23. Han, L., Wang, Y., Yan, Z., Li, X., & Ren, Z. (2024). Event-triggered formation control with obstacle avoidance for multi-agent systems applied to multi-UAV formation flying. *Control Engineering Practice, 153*, Article 106105. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.106105
24. Chen, X., Tang, J., & Lao, S. (2020). Review of unmanned aerial vehicle swarm communication architectures and routing protocols. *Applied Sciences, 10*(10), Article 3661. https://www.mdpi.com/2076-3417/10/10/3661
25. Clerigues, D., Wubben, J., Calafate, C. T., Cano, J.-C., & Manzoni, P. (2024). Enabling resilient UAV swarms through multi-hop wireless communications. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2024*, Article 39. https://doi.org/10.1186/s13638-024-02373-5
26. Li, J., Yang, G., Cai, Q., Niu, H., & Li, J. (2022). Cooperative navigation for UAVs in GNSS-denied area based on optimized belief propagation. *Measurement, 192*, Article 110797. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224122000975
27. Yao, F., Lan, C., Wang, L., Wan, H., Gao, T., & Wei, Z. (2024). GNSS-denied geolocalization of UAVs using terrain-weighted constraint optimization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 135*, Article 104277. https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104277
28. Akhihiero, D., Olawoye, U., Das, S., & Gross, J. N. (2024). Cooperative localization for GNSS-denied subterranean navigation: A UAV–UGV team approach. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 71*(4). https://doi.org/10.33012/navi.677

This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.