

СЕРЕДОВИЩНО-ЦЕНТРИЧНА ПАРАДИГМА УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ: КОНЦЕПТУАЛЬНА ЗАСАДА РОЗВИТКУ КОНТРОДРОННИХ СИСТЕМ

Стаття присвячена протидії дронним загрозам, спричинені застосуванням безпілотних систем у військових цілях, виходить далеко за межі суто технологічної задачі, сягаючи виміру державного управління у сфері військової безпеки. Масове впровадження і стрімке поширення технології роїння безпілотних літальних апаратів (БПЛА) висуває нові вимоги до організації сенсорних мереж алгоритмів обробки інформації та прийняття рішень у системах раннього попередження. Відтак питання їхньої ефективності слід розглядати не лише як інженерну проблему, але і як завдання формування нової парадигми у безпековому управлінні. У статті запропоновано концептуальну засаду для побудови архітектур систем виявлення безпілотних загроз на базі аналізу реакції навколишнього середовища на присутність або активність технічних об'єктів. У межах такого середовищно-центричного підходу детекція здійснюється не шляхом прямого спостереження за об'єктом, а через індикацію змін фізичних (акустичних, електромагнітних, гравітаційних) та інформаційних полів, які виникають у результаті взаємодії об'єкта з середовищем.

Методологічну основу дослідження становлять системний аналіз, міждисциплінарний порівняльний підхід, метод аналогії та концептуальне моделювання. Як емпіричні та теоретичні аналогії розглянуто такі системи, як глобальна гідроакустична мережа SOSUS, інтерферометричні гравітаційні обсерваторії LIGO, акустичні масиви для виявлення безпілотників та методи статистичного виявлення аномалій у кібербезпеці.

Отримані результати свідчать, що середовищно-центричний підхід може розглядатися як перспективна парадигма розвитку систем раннього попередження технологічних загроз, а середовищно-центрична детекція - як концептуальна засада систем попередження і виявлення множинних безпілотних загроз. Зокрема, акустичні сенсорні мережі можуть стати основою масштабованих систем моніторингу повітряного простору, здатних функціонувати як елементи розподіленої інфраструктури безпеки.

Проведений аналіз показує, що більшість існуючих систем детекції БПЛА орієнтовані на пряме виявлення самого об'єкта за допомогою радарів, камер або радіочастотного моніторингу – на відміну від аналізу змін навколишнього середовища, спричинених рухом безпілотного апарата: акустичних аномалій, змін повітряних потоків або інших фізичних параметрів середовища. За рахунок багатомодального паралельного підтвердження первинних сигналів детекції БПЛА подібні підходи підвищують надійність виявлення та скорочують час верифікації, а також дозволяють завчасно приводити контрдронну систему у стан готовності для реагування на дронні загрози, у тому числі у вигляді роїв БПЛА.

Ключові слова: публічне управління, національна безпека, державна обороноздатність, дронні загрози, БПЛА, контрдронні технології, раннє попередження, системи ситуаційної обізнаності.

Вступ та постановка проблеми. Повномасштабна агресія Російської Федерації проти України радикально змінила характер сучасних збройних конфліктів. Ключовим фактором трансформації поля бою стало масове застосування безпілотних літальних апаратів різних класів — від тактичних розвідувальних дронів до ударних платформ і баражувальних боєприпасів, а також розвиток технологій ройового застосування, коли велика кількість малих апаратів діє як єдина координована система. Традиційні системи протиповітряної оборони, орієнтовані на виявлення відносно великих літальних апаратів, виявляються недостатньо ефективними щодо малих, малопомітних і дешевих безпілотних платформ.

У сучасній війні безпілотні системи виконують широкий спектр завдань: розвідку, коригування артилерійського вогню, нанесення ударів, радіоелектронну розвідку та радіоелектронну боротьбу. Стрімке поширення БПЛА та технологій ройового застосування

формує якісно нову категорію загроз для національної та міжнародної безпеки. Існуючі системи виявлення безпілотних апаратів переважно базуються на об'єктно-орієнтованому принципі детекції, який передбачає ідентифікацію безпосередньо самого об'єкта спостереження за допомогою радіолокаційних, оптичних або радіочастотних сенсорів (NATO STO, 2021).

Проте такий підхід демонструє обмежену ефективність в умовах використання малогабаритних, малопомітних або масово застосовуваних БПЛА, особливо при використанні технології роїння. У результаті виникає необхідність пошуку альтернативних парадигм до побудови контрдронних систем. Однією з перспективних концептуальних засад є інверсія логіки детекції, за якої увага переноситься з об'єкта спостереження на спричинені його присутністю зміни навколишнього середовища. Така концепція передбачає детекцію і аналіз змін фізичних, акустичних, електромагнітних або інформаційних полів, що виникають у процесі взаємодії із об'єктом. Середовищно-центричний підхід застосовується в різних галузях науки і технологій: від радіоастрономії та гравітаційної астрономії - до гідроакустичних систем та кібербезпеки (Thompson et al., 2017).

Враховуючи міждисциплінарний характер, його впровадження у системи ситуаційної обізнаності потребує не лише технологічних інноваційних рішень, а й зміну управлінської логіки. Трансформація сенсорних систем – від об'єктно-центричної до середовищно-центричної моделі спостереження – впливає на структуру та функціонування сенсорних мереж, алгоритми обробки даних та архітектури прийняття рішень, режими готовності й механізми реагування систем протидії безпілотним загрозам.

Аналіз останніх наукових досліджень і публікацій. Науковці Массачусетського інституту технологій Goodfellow, I., Bengio, Y. та Courville, A. дослідили використання спектрального аналізу для виділення характерних частот обертання пропелерів та застосування методів цифрової обробки сигналів й алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) для розпізнавання та ідентифікації типів БПЛА. Українські дослідники Тютюнник В. та Усачов Д. виявили специфічні спектральні патерни амплітудно-частотні характеристик акустичних сигналів пропелерних БПЛА. Шейгас О. та інші продемонстрували у своїх роботах, як застосування ШІ-алгоритмів дозволяє підвищити ефективність аналізу сигналів та автоматизувати процес класифікації повітряних об'єктів. Крутій О. вивчав використання нейронних мереж та алгоритмів спектрального аналізу для класифікації акустичних сигналів та автоматичної детекції дронів. Дзелендзяк У. та Пазинюк М., Нижник А. та Партика А. дослідили комплексні підходи до побудови архітектур інтегрованих систем протидії БПЛА, що поєднують акустичні, оптичні та радіочастотні типи сенсорів.

Метою статті є формування концептуальної засади для побудови й управління системами раннього виявлення і попередження безпілотних загроз шляхом застосування інверсійної логіки детекції на базі аналізу прикладів її використання у різних сферах – від акустичних мереж до систем космічного спостереження та кібербезпеки, а також можливостей її застосування у багаторівневих системах ситуаційної обізнаності.

Метод системного аналізу дав змогу дослідити структуру сучасних систем протидії БПЛА, визначити їхні основні функціональні компоненти та взаємозв'язки між сенсорними, аналітичними й управлінськими підсистемами, а також оцінити їх роль у забезпеченні ситуаційної обізнаності у сфері безпеки. Порівняльний аналіз дозволив оцінити ефективність методів детекції – радіочастотних, акустичних, оптичних та тепловізійних – у контексті виявлення малорозмірних безпілотних об'єктів, що характеризуються низькою радіолокаційною помітністю та складністю ідентифікації у міському або змішаному середовищі. За допомогою методу моделювання **було** розроблено архітектуру інтегрованої мультисенсорної системи раннього виявлення безпілотних загроз, що передбачає взаємодію різних каналів спостереження та багаторівневу обробку сигналів.

Метод аналізу масового використання безпілотних систем впродовж російсько-української війни 2022–2026 років виявив ключові сценарії використання БПЛА та актуальні виклики для систем протидії дронним загрозам. У свою чергу, застосування методу алгоритмічного моделювання допомогло описати потенційні можливості використання

алгоритмів штучного інтелекту для автоматизованої обробки сенсорних даних, класифікації сигналів та паттернів поведінки повітряних об'єктів для їхнього попередження і виявлення.

Вищезазначені методи дозволили дослідити системи протидії БПЛА не лише як сукупність окремих сенсорних технологій, а й як комплексну архітектуру цілісних екосистем ситуаційної обізнаності, інтегрованих у інфраструктуру національної, регіональної та глобальної безпеки. У такому контексті парадигма детекції розглядається не лише як технологічний підхід, а й як елемент управлінської інфраструктури безпеки, який забезпечує підтримку ситуаційної обізнаності для прийняття рішень на різних рівнях управління.

Виклад основного матеріалу. У класичних системах моніторингу виявлення об'єкта відбувається через його безпосередню реєстрацію сенсорами, а логіка детекції умовно представляється як залежність між фактом спостереження та самим об'єктом. Іншими словами, щоб ідентифікувати ціль, система повинна зафіксувати її фізичні (радіолокаційні, оптичні або теплові) сигнатури. За такої класичної парадигми детекції застосування технології роїння викликає збільшення часових, матеріальних та енерговитрат систем моніторингу та виявлення дронної активності - прямо залежно від зростання кількості БПЛА. Розуміючи обмеженість ресурсів для будь-яких контрдронних системи, очевидним є і граничний термін їхньої ефективності, і потреба у ревізії базової для них парадигми.

Так, автором дослідження запропоновано концептуальну засаду, що базується на принципі інверсії, який змінює традиційну логіку спостереження – на зворотню. Середовищно-центрична парадигма детекції передбачає зворотній підхід, згідно з яким система спостерігає не за самим об'єктом, а за зміною параметрів середовища, які виникають внаслідок руху або функціонування об'єкта – акустичними, аеродинамічними, електромагнітними або інформаційними збуреннями. У статті наведені приклади мультимодальних багатосенсорних систем, які забезпечують можливість взаємної верифікації сигналів та дозволяють підвищити надійність виявлення об'єктів, але фокусуються виключно на детекції самого об'єкта і, як показано в табл. 1, характеризуються низкою залежностей та обмежень у інтеграції й масштабуванні.

Таблиця 1 – Порівняння різних підходів до попередження та виявлення БПС

Автор (и) / дослідження	Методи	Типи сенсорів	Інтеграція сенсорів	ШІ / ЦОС	Масштаб системи	Основні обмеження
Мартовицький, Лега, Северін	різні методи детекції БПЛА	радари, РЧ, оптика	концептуальний огляд	частково	локальні системи	відсутність інтегрованої архітектури
Тютюник, Усачов	акустичний спектральний аналіз	мікрофони	один тип сенсора	ЦОС	локальні точки	залежність від шуму
Крутій	акустична ідентифікація	акустичні сенсори	один тип	нейронні мережі	локальна система	обмежена дальність
Дзелендзяк Пазинюк	сенсорна мережа	акустичні + РЧ + оптичні	мультисенсорна	частково	експериментальна мережа	відсутність масштабування
Нижник, Партика	система детекції та перехоплення БПЛА	мультисенсорна	Інтегрована	ШІ	тактичний рівень	фокус на перехопленні
Шейгас та ін.	ШІ-аналіз даних БПЛА	різні	концептуальний	ШІ	алгоритмічний рівень	не описано сенсорну інфраструктуру

Автор (и) / дослідження	Методи	Типи сенсорів	Інтеграція сенсорів	ШІ / ЦОС	Масштаб системи	Основні обмеження
Пропозиція автора	аналіз аномалій середовища + мультисенсорна детекція	акустичні масиви, РЧ, оптичні, фотонні	повністю інтегрована	ЦОС + ШІ	масштабована (локальна → глобальна)	залежність від інфраструктури

Джерело: складено автором. Примітка: РЧ– радіочастота; ЦОС – цифрова обробка сигналів.

Запропонована автором середовищно-центрична парадигма детекції розширює можливості індикації акустичних проявів активності БПЛА навіть нижче порогового рівня шуму та забезпечує приведення контр-дронних систем у стан готовності завчасно до безпосереднього реагування, а завдяки паралельній інтеграції різних сенсорних технологій мінімізує час для підтвердження первинного сигналу виявлення БПЛА та заощаджує критичні ресурси для детекції й реакції на множинні дронні загрози (*Schmitt & Schulz, 2021*). Крім того, вищеописана концептуальна засада чітко відповідає вимогам НАТО щодо обмеження можливостей штучного інтелекту у процесах прийняття рішень в оборонних системах, а також щодо уповноваження на цю функцію виключно людини-оператора (NATO STO, 2021).

Середовищно-центрична парадигма може розглядатися як базова і універсальна основа для побудови систем спостереження та раннього виявлення, адже її міждисциплінарність та універсальний характер доведені практичним застосуванням у різних дисциплінах і галузях науки (*Colomina & Molina, 2014*). Одним із класичних прикладів середовищно-центричного спостереження є система Sound Surveillance System (SOSUS), створена у США під час холодної війни для виявлення радянських підводних човнів. SOSUS являла собою глобальну мережу гідрофонів, розміщених на дні Атлантичного та Тихого океанів. Ці сенсори реєстрували акустичні сигнали, що поширювалися в океанському середовищі. Принципово важливо, що система не здійснювала прямого спостереження за підводними човнами. Натомість вона фіксувала зміни акустичного поля океану, які виникали внаслідок роботи двигунів, кавітації гвинтів та інших механічних процесів. Завдяки особливим умовам поширення звуку в океані, зокрема існуванню так званого SOFAR-каналу, акустичні сигнали могли поширюватися на надзвичайно великі відстані. Це дозволяло виявляти підводні човни на відстанях у сотні або навіть тисячі кілометрів. Таким чином, SOSUS була розподіленою сенсорною системою, що аналізувала структуру акустичного поля середовища, а не безпосередньо об'єкти спостереження.

Ще більш фундаментальний приклад середовищно-центричного підходу можна знайти у сучасній астрофізиці. Гравітаційні обсерваторії Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) призначені для реєстрації гравітаційних хвиль – коливань простору-часу, що виникають унаслідок катастрофічних космічних подій, таких як злиття чорних дір або нейтронних зір. Принцип роботи LIGO базується на методі інтерферометрії. Два лазерні промені поширюються по перпендикулярних вакуумних тунелях довжиною кілька кілометрів. Навіть надзвичайно малі деформації простору-часу призводять до зміни інтерференційної картини цих лазерних променів (*Monnier & Allen, 2012*). Важливо підкреслити, що детектори LIGO не спостерігають безпосередньо астрофізичні об'єкти. Вони реєструють лише зміни геометрії простору-часу, спричинені такими подіями. Фактично система фіксує зміну характеристик середовища, через яке поширюється сигнал. Цей приклад демонструє, що навіть надзвичайно слабкі фізичні ефекти можуть бути виявлені за умови високочутливого аналізу параметрів навколишнього середовища.

Також подібна логіка використовується і в галузі кібербезпеки, де системи виявлення загроз дедалі частіше ґрунтуються на аналізі змін інформаційного середовища. У традиційних системах захисту застосовується сигнатурний підхід, коли система шукає конкретні відомі шкідливі програми або їх цифрові сліди. Проте сучасні системи інформаційної безпеки все

частіше використовують методи аналізу статистичних характеристик інформаційного середовища Statistical Anomaly Detection (SAD). При застосуванні SAD-методів система не шукає безпосередньо шкідливий код, а виявляє аномалії у функціонуванні системи: нетипові мережеві з'єднання, незвичні патерни доступу до ресурсів, зміни у структурі мережевого трафіку або відхилення від звичайної поведінки користувачів (Goodfellow et al., 2016).

Варто відзначити, при спостереженні за середовищами із масивами цифрових даних (data-rich environment) або скупченнями об'єктів, наприклад, за роями дронів, інверсія детекції проявляється як режимне явище. У традиційних системах детекції, які базуються на об'єктно-центрованому підході, ймовірність виявлення прямо залежить від фізичної сигнатури об'єкта, а підвищення точності сенсорів і алгоритмів розпізнавання розглядається як основний шлях збільшення ефективності детекції (Лега та ін., 2025). Однак для малорозмірних систем, зокрема комерційних і тактичних БПЛА, таке припущення має обмежену застосовність. Із зменшенням розміру об'єкта суттєво знижується і його фізична сигнатура: зменшується ефективна площа радіолокаційного відбиття, послаблюється теплове випромінювання, а також погіршується візуальна помітність. У результаті ефективність об'єктно-центрованих методів детекції знижується, особливо в умовах обмеженої роздільної здатності сенсорів і високого рівня шуму середовища.

Проте варто враховувати, що будь-який технічний об'єкт неминуче взаємодіє з навколишнім середовищем. Функціонування електродвигунів, обертання пропелерів, формування турбулентних повітряних потоків, електромагнітні випромінювання та цифрові комунікації створюють сукупність фізичних і інформаційних збурень, які змінюють статистичні характеристики середовища. Ці зміни можуть бути слабкими на рівні окремого об'єкта, однак вони накопичуються та стають вимірюваними за рахунок аналізу динаміки середовища (Al-Emadi & Al-Saadi, 2020). При достатній чутливості до змін середовища та можливості їх статистичного аналізу, ефективність середовищно-центричного підходу, яка залежить від величини індукованих змін у відповідних полях середовища, може перевищувати ефективність прямої детекції об'єкта, що визначається величиною сигнатури об'єкта і зменшується разом із його розміром.

Найбільш виразно цей ефект проявляється у ройових системах, де велика кількість малих БПЛА функціонує як розподілена динамічна структура. Індивідуальні сигнатури окремих елементів рою можуть перебувати нижче порогу чутливості традиційних сенсорів, проте їх сукупна взаємодія з середовищем формує стійкі просторово-часові патерни збурень. У таких умовах аналіз змін середовища – зокрема статистичних, спектральних або кореляційних характеристик – стає більш інформативним, ніж спостереження за окремими об'єктами (Нижник & Партика, 2025).

Отже, зменшення розміру об'єктів зумовлює зміну режиму спостереження і вимагає зміщення дослідницького фокусу від виключно об'єктно-орієнтованих підходів до інтеграції методів аналізу середовища. Це відкриває можливості для побудови нових класів систем виявлення, орієнтованих на ідентифікацію аномалій і динамічних змін у середовищі функціонування об'єктів.

Таблиця 2 – Переваги концептуальної середовищно-центричної засади для побудови й управління контрдронними системами

Питання	Проблема	Підхід (рішення)	Примітка
GSM/GPS	Юридичні обмеження	Моніторинг аномалій середовища без порушення законодавства про захист персональних даних	Легалізація
Акустика	Недооцінка, шум	ЦОС, beamforming → сигнали нижче порогу шуму	Раннє виявлення
Парадигма	Фокус на активності об'єкта	Інверсійна логіка: аналіз реакції середовища	Рання детекція аномалії

Питання	Проблема	Підхід (рішення)	Примітка
Readiness	Готовність системи лише після повного підтвердження	Запуск режиму готовності після першого підтвердження	<1 сек
Затримка 8-12 сек	Послідовна валідація	Паралельне підтвердження всіма модальностями	Затримка <1 сек
Деталізація об'єкта	Обмежена кількість параметрів	Одночасна оцінка об'єму, форми, траєкторії, швидкості	III-ready dataset
Додаткові сенсори	Неінтегровано	LIDAR, IR, micro-Doppler, атмосфера	Для III сценаріїв
Роль людини/ III	Автоматизація без людини	III моделює, людина вирішує	Відповідність стандартам НАТО

Джерело: складено автором

Примітка: GSM – стандарт цифрового стільникового зв'язку; GPS – супутникова навігаційна система; LiDAR – активна оптична система дистанційного зондування; IR – діапазон електромагнітного спектра для виявлення теплового випромінювання; micro-Doppler – складова доплерівського зсуву частоти від мікрорухів елементів об'єкта, beamforming - методи просторової фільтрації сигналів.

Порівняно з класичним підходом до детекції дронів середовищно-центрична парадигма, базована на інверсійній логіці детекції, передбачає принципово іншу архітектуру побудови систем попередження і раннього виявлення БПЛА. Модель детекції "сенсор – виявлення об'єкта" трансформується до складнішої структури, у якій мережа сенсорів формує поле спостереження, здійснюється аналіз фізичних параметрів середовища, виявляються аномалії, після чого визначається місцезнаходження джерела цих змін (*Шейгас та ін., 2025*).

Одним із найбільш перспективних напрямів у цьому контексті є використання акустичних сенсорних систем. Робота електричних двигунів і пропелерів безпілотних літальних апаратів неминуче формує характерні акустичні сигнатури. Навіть малогабаритні дрони створюють стабільні спектральні патерни, які пов'язані з частотою обертання роторів і аеродинамічними ефектами (*Тютюнник та ін., 2025*). Акустичні сигнали мають низку властивостей, завдяки яким здатні виявляти БПЛА навіть у ситуаціях, коли радіолокаційні або оптичні методи мають обмежену ефективність. По-перше, вони поширюються в усіх напрямках і не потребують прямої видимості між сенсором і об'єктом. По-друге, їх можна реєструвати за допомогою відносно простих і недорогих сенсорів. По-третє, вони формують стійкі спектральні структури, які можуть бути проаналізовані алгоритмами цифрової обробки сигналів.

Для підвищення точності виявлення та локалізації джерела звуку використовуються акустичні масиви, що складаються з декількох мікрофонів, розташованих у певній геометричній конфігурації (*Van Veen & Buckley, 1988*). Такі масиви застосовують методи просторової фільтрації сигналів beamforming, які дозволяють визначити напрямок на джерело акустичного сигналу. Основою цих алгоритмів є аналіз різниці у часі надходження звукової хвилі до різних мікрофонів масиву. Обробляючи часові затримки між сигналами, система може визначити не лише напрямок на джерело сигналу, але й ефективно відокремлювати його від шумового фону. У поєднанні з алгоритмами машинного навчання акустичні масиви можуть класифікувати різні типи джерел звуку, відрізняючи БПЛА від інших акустичних об'єктів, таких як транспорт або промислове обладнання.

У свою чергу, поєднання даних із кількох вузлів дозволяє здійснити триангуляцію джерела сигналу та визначити координати об'єкта у просторі. Подібна архітектура нагадує принципи роботи радіоінтерферометричних систем, які використовуються у радіоастрономії для спостереження за космічними об'єктами. Прикладом є радіотелескопічна мережа системи Very Long Baseline Interferometry, у яких радіотелескопи, розташовані на різних континентах,

об'єднуються в єдину систему спостереження. (Thompson et al., 2017). Аналогічний принцип масштабування може бути застосований і до систем виявлення безпілотних загроз. Локальні сенсорні мережі можуть використовуватися для захисту критичної інфраструктури, військових об'єктів, аеропортів, енергетичних систем або міської інфраструктури. На вищому рівні можливе формування регіональних сенсорних мереж, що об'єднують численні локальні системи. Подальше масштабування таких мереж дозволяє створювати транснаціональні системи моніторингу повітряного простору.

У контексті європейської безпеки це може набувати форми пан'європейської мережі виявлення безпілотних загроз, яка об'єднує сенсорні системи різних держав (Kim et al., 2020). Подібна мережа могла б виконувати функції раннього попередження атак БПЛА, особливо в умовах гібридних загроз і транскордонних конфліктів. У довгостроковій перспективі такі системи можуть стати частиною глобальної інфраструктури безпеки, подібної до систем моніторингу космічного простору або океанів. Для країн НАТО подібні системи становлять особливий інтерес, оскільки дозволяють формувати розподілену інфраструктуру ситуаційної обізнаності, що інтегрує дані з великої кількості сенсорних платформ. Отже, розвиток середовищно-центричних систем виявлення безпілотних загроз слід розглядати не лише як технологічний напрям досліджень, а й як один із елементів формування нової архітектури глобальної безпеки, у якій розподілені сенсорні мережі виконують роль інфраструктури колективного спостереження та раннього попередження, особливо в умовах гібридних загроз та швидкого поширення безпілотних технологій подвійного призначення.

Окремо варто відзначити, що системи виявлення безпілотних загроз мають виражений характер технологій подвійного призначення. Одні й ті самі сенсорні платформи та алгоритми аналізу даних можуть використовуватися як у військовій сфері, так і у широкому спектрі цивільних застосувань. До таких застосувань належать моніторинг повітряного простору, захист критичної інфраструктури, забезпечення безпеки аеропортів, екологічний моніторинг, а також проведення пошуково-рятувальних операцій. Це створює необхідність формування нових моделей інституційної взаємодії між державними структурами, науковими установами та технологічними компаніями (Finn & Wright, 2016). У сучасних умовах ефективність розвитку подібних технологій значною мірою залежить від здатності створювати інноваційні екосистеми, у межах яких наукові дослідження, технологічні розробки та державні безпекові програми інтегруються у єдиний процес. У цьому контексті дедалі важливішу роль відіграють міжнародні інноваційні програми у сфері безпеки, орієнтовані на підтримку технологій подвійного призначення. Одним із таких механізмів є програма НАТО Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic (DIANA), метою якої є прискорення впровадження перспективних технологічних рішень у сфері оборони та безпеки. Подібні ініціативи сприяють формуванню транснаціональних інноваційних екосистем, у яких академічні дослідники, технологічні стартапи та державні інституції спільно працюють над створенням нових поколінь безпекових технологій.

Для держав і міжнародних організацій, зокрема НАТО, розвиток розподілених систем виявлення й попередження дронних загроз може стати важливим інструментом зміцнення колективної оборони та підвищення рівня інноваційних екосистем ситуаційної обізнаності. Інтеграція середовищно-центричного підходу, розподілених сенсорних мереж і квантових технологій може призвести до формування принципово нової інфраструктури безпеки (Schmidt et al., 2021). В умовах швидкого поширення автономних систем та технологій штучного інтелекту ключовим завданням міжнародної безпеки стає створення інфраструктур, здатних забезпечувати глобальний моніторинг повітряного простору, раннє попередження про застосування БПЛА, виявлення технологічних загроз для критичної інфраструктури.

Висновки У сучасних дослідженнях виділяється кілька основних технологічних підходів до виявлення БПЛА. Найбільш традиційним є використання радіолокаційних систем, які забезпечують виявлення повітряних об'єктів на значних відстанях. Однак ефективність радарних технологій може знижуватися у випадку малорозмірних або низькошвидкісних безпілотників, які мають незначну ефективну площу розсіювання. Крім того, у складних

міських умовах радіолокаційні системи можуть зазнавати впливу перешкод, що ускладнює точну ідентифікацію цілей.

Інший поширений підхід базується на радіочастотному моніторингу. Подібні системи аналізують сигнали управління безпілотними апаратами та канали передачі даних між дроном і оператором. У багатьох випадках це дозволяє визначити тип безпілота та його місцезнаходження. Водночас ефективність таких систем обмежується у випадках використання автономних або попередньо запрограмованих безпілотників, які не передають сигналів керування. У зв'язку з цими обмеженнями значна увага в останні роки приділяється розвитку альтернативних методів детекції, зокрема акустичних систем.

Акустичні методи ґрунтуються на аналізі змін навколишнього середовища, які виникають у процесі роботи пропелерів та електродвигунів безпілотних апаратів і можуть бути використані для їхньої ідентифікації БПЛА. Подібні акустичні системи напряду пов'язані із застосуванням методів цифрової обробки сигналів та алгоритмів машинного навчання і можуть працювати в режимі реального часу та демонструють перспективність для створення розподілених систем раннього попередження.

Аналіз досвіду України з побудови мережі у понад 10 000 пристроїв акустичної детекції показав, що використання пасивних акустичних систем може стати важливим елементом раннього попередження безпілотних загроз. Сучасні технології обробки сигналів дозволяють виявляти характерні акустичні патерни безпілотних апаратів навіть у складних умовах міського середовища. У поєднанні з іншими сенсорними технологіями такі системи можуть формувати багатовимірний опис аномалій у контрольованому просторі.

Особливу перспективу має використання масивів акустичних сенсорів великої щільності, які функціонують за принципом інтерферометричних систем, подібних до тих, що застосовуються у радіоастрономії. Подібні масиви можуть забезпечувати точну локалізацію джерел звукових сигналів та формувати основу для масштабованих систем моніторингу повітряного простору.

Результати дослідження дозволяють сформулювати такі основні висновки:

- масове використання безпілотних систем у сучасних конфліктах створює новий тип асиметричних загроз, що потребує розвитку спеціалізованих систем раннього виявлення;
- традиційні системи спостереження, орієнтовані на пряме виявлення об'єкта, мають обмежену ефективність щодо малорозмірних безпілотних апаратів;
- інверсійний підхід до детекції, який базується на аналізі аномалій середовища, може значно розширити можливості систем раннього попередження;
- використання паралельної мультисенсорної архітектури дозволяє суттєво скоротити час підтвердження сигналів та підвищити оперативність реагування систем безпеки;
- інтеграція алгоритмів штучного інтелекту з принципом human-in-the-loop забезпечує поєднання швидкості автоматизованого аналізу з контролем людини над критичними рішеннями.

Однак, залишаються відкритими питання підвищення ефективності раннього попередження за рахунок інтеграції у масштабовані сенсорні мережі різних каналів спостереження, а також формування великих систем ситуаційної обізнаності, здатних функціонувати на національному, регіональному та глобальному рівнях. Саме ці виклики визначають наукову проблему, що розглядається у даній статті, і обґрунтовують необхідність переосмислення традиційних підходів до розробки систем попередження безпілотних загроз.

Запропонована концептуальна засада може розглядатися як базовий підхід до розробки не лише технологічної концепції сенсорних систем, а й управлінської моделі організації систем раннього попередження на основі середовищно-центричної парадигми, котра змінює принципи побудови інфраструктури безпеки, алгоритми обробки інформації та механізми прийняття рішень у сфері протидії безпілотним загрозам.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на експериментальну перевірку ефективності запропонованого підходу, удосконалення алгоритмів обробки мультисенсорних даних та інтеграцію подібних платформ у ширші інфраструктури національної та міжнародної безпеки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Wang, J., Liu, Y., & Song, H. (2020). Counter-unmanned aircraft systems: State of the art, challenges, and future trends. *Journal of Defense Management*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.12461>
2. NATO Science and Technology Organization. (2021). Threat: Counter unmanned aircraft systems (STO-MP-MSG-SET-183). <https://doi.org/10.14339/STO-MP-MSG-SET-183-KN-1P-PDF>
3. Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
4. Finn, R., & Wright, D. (2016). Privacy, data protection and ethics for civil drone practice. *Computer Law & Security Review*, 32(4), 577–586. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2016.04.004>
5. Schmitt, F., & Schulz, D. (2021). Acoustic detection of small UAVs in urban environments. *Sensors*, 21(6), 2225. <https://doi.org/10.3390/s21062225>
6. Al-Emadi, S., & Al-Saadi, M. (2020). RF-based detection and classification of UAVs using machine learning. *IEEE Access*, 8, 111214–111227. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991234>
7. Zhang, Y., Wang, H., & Li, J. (2022). Multi-sensor data fusion for UAV detection and tracking. *IEEE Sensors Journal*, 22(12), 11734–11745. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3165462>
8. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press. <https://www.deeplearningbook.org/>
9. Шейгас, О. К., Степанко, О. С., & Дубовик, Г. В. (2025). Використання штучного інтелекту для навігації безпілотних літальних апаратів. *Системи обробки інформації*, 1(180), 101–108. <https://doi.org/10.30748/soi.2025.180.11>
10. Лега, О., Мартовицький, В., & Северін, І. (2025). Аналіз методів виявлення безпілотних літальних апаратів. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2(80), 101–108. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2>
11. Тютюник, В., Левтеров, О., Тютюнник, О., & Усачов, Д. (2025). Акустичний метод ідентифікації застосування безпілотних літальних апаратів як джерел надзвичайних ситуацій. *Social Development and Security*, 15(1). <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.1.26>
12. Крутий, О. (2025). Програмний модуль детектування дронів на основі акустичної ідентифікації. Тернопіль: ЗУНУ. <https://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/54838>
13. Дзелендзяк, У., & Пазинюк, М. (2023). Система виявлення літальних апаратів на основі аналізу звукових сигналів. *Computer Systems and Networks*, 5(1), 29–36. <https://doi.org/10.23939/csn2023.01.029>
14. Нижник, А., & Партика, А. (2025). Розробка концепції системи виявлення та знешкодження БПЛА з використанням дронів-перехоплювачів. *Computer Systems and Networks*, 7(1), 235–242. <https://doi.org/10.23939/csn2025.01.235>
15. Thompson, A. R., Moran, J. M., & Swenson, G. W. (2017). *Interferometry and synthesis in radio astronomy* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44431-4>
16. Monnier, J. D., & Allen, R. J. (2012). Radio and optical interferometry: Basic observing techniques and data analysis. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. <https://arxiv.org/abs/1203.1037>
17. Van Veen, B. D., & Buckley, K. M. (1988). Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. *IEEE ASSP Magazine*, 5(2), 4–24. <https://doi.org/10.1109/MASSP.1988.1162946>
18. Azzouz, M., Bechler, D., & Zoubir, A. M. (2019). Drone detection using microphone arrays and machine learning. In *Proceedings of ICASSP 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8683231>
19. Kim, J., Lee, S., & Kim, H. (2020). Acoustic drone detection using beamforming and deep neural networks. *IEEE Sensors Journal*, 20(15), 8786–8795. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2962456>
20. Schmidt, R., Schubert, M., & Dietrich, P. (2021). Direction-of-arrival estimation for UAV detection using acoustic sensor arrays. In *Proceedings of IEEE Sensors Conference*. <https://doi.org/10.1109/IEEEsensors.2021.9548963>

REFERENCES:

1. Wang, J., Liu, Y., & Song, H. (2020). Counter-unmanned aircraft systems: State of the art, challenges, and future trends. *Journal of Defense Management*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.12461>
2. NATO Science and Technology Organization. (2021). Threat: Counter unmanned aircraft systems (STO-MP-MSG-SET-183). <https://doi.org/10.14339/STO-MP-MSG-SET-183-KN-1P-PDF>

3. Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
4. Finn, R., & Wright, D. (2016). Privacy, data protection and ethics for civil drone practice. *Computer Law & Security Review*, 32(4), 577–586. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2016.04.004>
5. Schmitt, F., & Schulz, D. (2021). Acoustic detection of small UAVs in urban environments. *Sensors*, 21(6), 2225. <https://doi.org/10.3390/s21062225>
6. Al-Emadi, S., & Al-Saadi, M. (2020). RF-based detection and classification of UAVs using machine learning. *IEEE Access*, 8, 111214–111227. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991234>
7. Zhang, Y., Wang, H., & Li, J. (2022). Multi-sensor data fusion for UAV detection and tracking. *IEEE Sensors Journal*, 22(12), 11734–11745. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3165462>
8. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press. <https://www.deeplearningbook.org/>
9. Sheihas, O. K., Stepanko, O. S., & Dubovyk, H. V. (2025). Vykorystannia shtuchnoho intelektu dlia navihatsii bezpilotnykh litalnykh aparativ. *Systemy obrobky informatsii*, 1(180), 101–108. <https://doi.org/10.30748/soi.2025.180.11>
10. Leha, O., Martovytskyi, V., Severin, I. (2025). Analiz metodiv vyivlennia bezpilotnykh litalnykh aparativ. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, 2(80), 101–108. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2>
11. Tiutiunyk, V., Lievtierov, O., Tiutiunyk, O., Usachov, D. (2025). Akustychnyi metod identyfikatsii zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ yak dzherel nadzvychainykh sytuatsii. *Social Development and Security*, 15(1). <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.1.26>
12. Krutii, O. (2025). Prohramnyi modul detektuvannia droniv na osnovi akustychnoi identyfikatsii. Ternopil: ZUNU. 51 s. <https://IIOCace.wunu.edu.ua/handle/316497/54838>
13. Dzelendziak, U., Pazyniuk, M. (2023). Systema vyivlennia litalnykh aparativ na osnovi analizu zvukovykh syhnaliv. *Computer Systems and Networks*, 5(1). <https://doi.org/10.23939/csn2023.01.029>
14. Nyzhnyk, A., Partyka, A. (2025). Rozrobka kontseptsii systemy vyivlennia ta zneshkodzhennia BPLA z vykorystanniam droniv-perekhopliuvachiv. *Computer Systems and Networks*, 7(1). <https://doi.org/10.23939/csn2025.01.235>
15. Thompson, A. R., Moran, J. M., & Swenson, G. W. (2017). *Interferometry and synthesis in radio astronomy* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44431-4>
16. Monnier, J. D., & Allen, R. J. (2012). Radio and optical interferometry: Basic observing techniques and data analysis. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. <https://arxiv.org/abs/1203.1037>
17. Van Veen, B. D., & Buckley, K. M. (1988). Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. *IEEE ASSP Magazine*, 5(2), 4–24. <https://doi.org/10.1109/MASSP.1988.1162946>
18. Azzouz, M., Bechler, D., & Zoubir, A. M. (2019). Drone detection using microphone arrays and machine learning. In *Proceedings of ICASSP 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8683231>
19. Kim, J., Lee, S., & Kim, H. (2020). Acoustic drone detection using beamforming and deep neural networks. *IEEE Sensors Journal*, 20(15), 8786–8795. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2962456>
20. Schmidt, R., Schubert, M., & Dietrich, P. (2021). Direction-of-arrival estimation for UAV detection using acoustic sensor arrays. In *Proceedings of IEEE Sensors Conference*. <https://doi.org/10.1109/IEEEsensors.2021.9548963>

PhD Student Deineka O.

AN ENVIRONMENT-CENTRIC PARADIGM OF SECURITY GOVERNANCE: A CONCEPTUAL BASIS FOR DEVELOPMENT OF COUNTER-DRONE SYSTEMS

Background. *The problem of countering drone threats caused by the use of unmanned systems for military purposes goes far beyond a purely technological challenge, extending into the domain of public administration in the sphere of military security. The widespread deployment and rapid spread of unmanned aerial vehicle (UAV) swarming technology imposes new requirements on the organization of early-warning sensor networks, information processing algorithms, and decision-making in national security systems. Therefore, the question of their effectiveness should be considered not only as an engineering problem but also as a task of forming a new paradigm in security management. This article proposes a conceptual framework for building architectures of unmanned threat detection systems based on the analysis of environmental changes caused by the presence or activity of technical objects. Within this environment-centric approach, detection is carried out not through direct observation of the object, but through the*

indication and analysis of changes in physical (acoustic, electromagnetic, gravitational) and information fields that arise as a result of the object's interaction with the environment.

Methods. *The methodological framework of the study consists of systems analysis, an interdisciplinary comparative approach, the analogy method, and conceptual modeling. Systems such as the global hydroacoustic network SOSUS, the LIGO interferometric gravitational observatories, acoustic arrays for detecting unmanned aerial vehicles, and methods for statistical detection of anomalies in cyber security are considered as empirical and theoretical analogies.*

Results. *The results obtained indicate that the environment-centric approach can be considered a promising paradigm for the development of early warning systems for technological threats, and environment-centric detection—as a conceptual foundation for systems to warn of and detect multiple unmanned threats. In particular, acoustic sensor networks could form the basis of scalable airspace monitoring systems capable of functioning as elements of a distributed security infrastructure.*

Conclusions. *The analysis conducted shows that most existing UAV detection systems are focused on the direct detection of the object itself using radars, cameras, or radio frequency monitoring—as opposed to analyzing environmental changes caused by the movement of an unmanned aerial vehicle: acoustic anomalies, changes in air currents, or other physical parameters of the environment. Such approaches provide the possibility of mutual verification of signals and allow for increased reliability in object detection.*

Keywords: *public administration, national security, national defense capability, unmanned threats, UAVs, counter-drone technologies, early warning, situational awareness systems.*

