

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-1>

УДК

РУДНЄВ Микита

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

e-mail: [m.rudniev@student.csn.khai.edu](mailto:m.rudniev@student.csn.khai.edu)

## АНАЛІЗ КОМПЛЕКСІВ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ ТА НАЗЕМНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАДАЧ МОНІТОРИНГУ ЕКОЛОГІЧНО- КРИТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті досліджено особливості сучасних безпілотних літальних та наземних мобільних систем (БЛМНС) і їх застосування для моніторингу екологічно критичних об'єктів. Розглянуто класифікацію безпілотних апаратів, методи їх зв'язку та архітектуру Internet of Drones (IoD). Визначено переваги та виклики використання БЛМНС, обґрунтовано необхідність інтеграції різних технологій для підвищення ефективності моніторингу. Запропоновано оптимальні конфігурації безпілотних систем для виконання моніторингу та реагування на надзвичайні ситуації.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, безпілотні наземні апарати, рої дронів, Internet of Drones, системи моніторингу, екологічна безпека.

RUDNIEV Mykyta

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", NAU "KhAI"

## ANALYSIS OF UNMANNED AERIAL AND GROUND MOBILE SYSTEMS FOR MONITORING ENVIRONMENTALLY CRITICAL OBJECTS

The article examines the features of modern unmanned aerial and ground mobile systems (UAGMS) and their application for monitoring environmentally critical objects. The classification of unmanned vehicles, communication methods, and the architecture of the Internet of Drones (IoD) are considered. The advantages and challenges of using UAGMS are identified, and the necessity of integrating various technologies to enhance monitoring efficiency is substantiated. Optimal configurations of unmanned systems are proposed for monitoring and responding to emergency situations.

Keywords: unmanned aerial vehicles, unmanned ground vehicles, drone swarms, Internet of Drones, monitoring systems, environmental safety.

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

Згідно з дослідженнями ДСНС 2011-2020-го року [1] Україна є найбільш критичним регіоном Європи з техногенного навантаження та в п'ять разів перевищує середньоєвропейський рівень. Ризики виникнення НС техногенного характеру є досить високим, що насамперед пов'язано з високим рівнем техногенного навантаження на регіони, наявністю комплексу енергетичних, хімічних, гірничодобувних об'єктів, значною кількістю промислово-міських агломерацій і високою щільністю населення у промислово розвинутих регіонах країни.

Агресія росії на території України призвела до ще більшого погіршення екологічного стану. На сьогодні більшість екологічних ризиків в Україні пов'язані з пошкодженням промислових об'єктів, будинків, енергетичної інфраструктури та екосистем, спричинених конфліктом, що триває [2]. Станом лише на кінець 2022-го року було пошкоджено або зруйновано понад 400 підприємств, включаючи хімічні заводи, площі лісових пожеж та інших насаджень сягнули 75 тис. га. Крім того, було розбомблено приблизно 40 складів нафти та палива, що спричинило викид 680 000 тонн нафтопродуктів. Війна створила серйозну загрозу для ядерної та радіаційної безпеки, поставивши під небезпеку 15 діючих ядерних реакторів, що може мати транскордонні наслідки.

Високі рівні ризику виникнення НС потребують якісного та своєчасного моніторингу екологічно-критичних об'єктів. В Україні діють відповідні контрольно-спостережні служби, що виконують завдання екологічного моніторингу, але сучасне завдання стоїть не лише у виконанні моніторингу, але й у підвищенні його наукового і технологічного рівня, ступеня репрезентивності та інформативності [3, 4].

Для виконання цього завдання на допомогу приходять безпілотні літальні та наземні апарати. Синергія використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та безпілотних наземних апаратів (БПНА) відкриває нові можливості для моніторингу та забезпечення екологічної безпеки [5,6,7]. БПЛА можуть забезпечувати швидке та ефективне обстеження великих територій, зокрема, завдяки можливості отримання аерофотознімків та збирання даних з різних сенсорів. З іншого боку, БПНА можуть виконувати завдання на місцевості, такі як збір проб, вимірювання радіаційного фону чи аналіз стану ґрунтів. Комбінація цих двох типів безпілотників дозволяє забезпечити комплексний підхід до моніторингу, що включає збір, аналіз та інтеграцію даних з різних джерел, підвищуючи ефективність та точність оцінки екологічної ситуації. Такий

підхід дозволяє швидко реагувати на НС, знижуючи ризики для довкілля та населення. Тому, завданням цієї роботи буде аналіз можливих рішень для моніторингу екологічно-критичних об'єктів.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ РІШЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

БЛНМС можна описати як з'єднання двох або більше робототехнічних систем для виконання місії як одна команда. Цю концепцію можна порівняти з біологічним симбіозом, який визначається як «будь-який тип тісної і довготривалої біологічної взаємодії між двома різними біологічними організмами, будь то мутуалістичний, коменсалістський або паразитичний» [8]. Хоча ролі кожного робота в системі різняться за складністю і важливістю, основна мета використання БЛНМС полягає в тому, щоб використовувати спеціалізацію багатьох робототехнічних конструкцій, замість того, щоб створювати одного універсального робота, який би виконував усі задачі. Таким чином, кожен робот призначений для виконання конкретної місії, яка є частиною більшої мети. Термін БЛНМС охоплює не лише конструкцію і функції окремих роботів-агентів, але й правила взаємодії, зв'язку і співпраці між роботами, а також одночасну роботу цих численних спеціалізованих роботів з метою створення цілісної ефективної системи.

Для початку варто ознайомитися з фундаментальною класифікацією різних роботів та індивідуальними функціональними можливостями кожної класифікації. Для цього було виконано класифікацію та синтез інформації з різних наукових статей.

#### Класифікація конструкцій БПНА

За особливостями конструкції БПНА можна поділити на:

1. Колісні апарати: є одним з найпоширеніших типів наземних роботів, що застосовуються для дослідження навколишнього середовища, незалежно від того, чи це добре облаштоване середовище, чи несприятливе середовище [9]. Зазвичай, такі апарати призначені для виконання спеціалізованої місії, що базується на результатах роботи його модуля розвідки і картографування. Колісні конструкції мають широкий спектр конфігурацій, від широко використовуваних чотириколісних конструкцій до складних багатоколісних роверів, призначених для пересування нерівними ландшафтами [10]. Розмір, конструкція і тип коліс можуть змінюватися залежно від робочого простору і спеціалізованих завдань, покладених на апарат. Колісні роботи використовуються в багатьох наукових галузях, промислових та військових цілях [11]. Міжнародні виробники та дистриб'ютори виготовляють різні комерційні апарати, які доступні на ринку. Ці апарати можуть бути оснащені широким спектром датчиків, механічних маніпуляторів і пристроїв управління, а також ШІ для полегшення процесів майже у всіх галузях промисловості та сферах застосування.

2. Гусеничні апарати є надійною та популярною альтернативою колісним [12]. Розподіляючи вагу апарату на більшу площу поверхні, створюється більше зчеплення з ґрунтом. Це дозволяє цим типам транспортних засобів працювати на нерівній місцевості з м'яким ґрунтом. Хоча вони повільніші за швидкістю, переваги підвищеного зчеплення і стійкості поєднуються зі стабільним і простим механізмом приводу, який дозволяє гусеничним транспортним засобам обертатися навколо себе. Більшість гусеничних платформ складається з двох гусеничних систем з обох боків апарату, кожна з яких має різноспрямоване керування [13].

3. Роботи на ногах: ножні конструкції можуть використовуватися для ходьби, бігу або навіть стрибків [14,15,16,17,18]. Конструкції на основі ніг можуть містити будь-яку кількість ніг на основі тварин, які імітуються, наприклад, двоногі, чотириногі, шестиногі і т.д. Різні конструкції можуть допомогти для пересування на різних типах поверхонь, залежно від кількості ніг та їхнього розташування.

4. Стрибаючі роботи: намагаються імітувати стрибки багатьох видів тварин, таких як жаби та кенгуру. Такий спосіб пересування може бути корисним для робота, коли він пересувається місцевістю з перешкодами, які неможливо подолати за допомогою традиційного колісного методу пересування. Однією з труднощів стрибкового способу пересування є проектування робота, який залишався б ідеально збалансованим під час кожного наступного стрибка, а для визначення центру тяжіння робота необхідно провести обширні випробування. Багато стрибучих роботів, таких як робот-кенгуру, використовують рухомі противаги для імітації хвоста. Це утримує робота від надмірного або недостатнього обертання під час кожного стрибка і налаштовує його на наступний стрибок [19].

#### Класифікація конструкцій БПЛА

Зростаючий інтерес до БПЛА в останні роки призвів до активної появи різних типів літальних апаратів з різною конфігурацією та компонентами, що відрізняються за формою і розмірами. БПЛА поділяються на чотири типи: однороторні, багатороторні, літальні та гібридні.

1. Однороторні (або вертольоти): ця категорія БПЛА злітає і сідає вертикально. Як правило, вони використовують основний гвинт для керування положенням (крен, тангаж і ривання) і хвостовий гвинт для керування напрямком. Основною перевагою є здатність перевозити важкі вантажі протягом тривалого часу польоту. Найбільшою складністю при розробці дрона з одним ротором є керування горизонтальним напрямком польоту. Використання одного ротора дозволяє дуже легко і ефективно здійснювати

вертикальний політ, але при використанні лише одного ротора важко досягти бокового повороту в певному напрямку [20].

2. Багатороторні [21] (або мультикоптери): це БПЛА, що мають більше двох роторів. Ця категорія БПЛА поділяється на п'ять підкатегорій: біроторні, трироторні, квадатороторні, гексатороторні та восьмироторні (октокоптери). Як і однороторні БПЛА, багатороторні БПЛА також забезпечують вертикальний зліт і посадку. Вони швидкі та маневрені в польоті, що дозволяє їм виконувати складні маневри та польоти в обмеженому просторі. Однак короткий час польоту є основним недоліком цих типів літальних апаратів.

3. Фіксоване крило [22]: принцип польоту цієї категорії БПЛА ґрунтується на простій конструкції фіксованого жорсткого крила. Класифікація цих дронів базується не лише на типі крила, але й на корпусі та системі живлення (літій-іонні, літій-полімерні акумулятори або газові). Вони поділяються на чотири підкатегорії: звичайні, стрілоподібні, зворотні стрілоподібні і дельтаплани. Крім того, вони можуть нести важче корисне навантаження, ніж багатороторні. Недоліком цих БПЛА є обмежена маневреність у польоті, що не дозволяє їм виконувати складні маневри і літати над обмеженим простором, а також необхідність злітно-посадкової смуги для зльоту і посадки.

4. Гібридні [23]: це вдосконалена версія, яка використовує переваги як багатороторних, так і фіксованих БПЛА. Вони пропонують хорошу маневреність і швидкість на великих відстанях. Вони можуть нести велике корисне навантаження і не потребують злітно-посадкової смуги. Основними недоліками є висока ціна, складна механіка, а також нижчі показники стабільності польоту і обмежений діапазон швидкостей.

### Методи зв'язку БА

У сфері безпілотних систем, що постійно розвивається, ефективний зв'язок між БПЛА та БПНА має першочергове значення. Така синергія забезпечує безперебійну координацію і розширює можливості автономних систем у різних сферах застосування - від моніторингу довкілля до реагування на катастрофи. У цьому розділі розглядаються можливі методи зв'язку для БА, які забезпечують стабільний, надійний і ефективний обмін даними.

1. Радіочастотний зв'язок [24]: мільярди пристроїв по всьому світу спілкуються за допомогою бездротових радіочастотних хвиль. Передавачі та приймачі пристроїв зв'язуються між собою на певній радіочастоті. Цей метод зв'язку часто використовується БА.

Переваги	Недоліки
Специфічні радіочастотні сигнатури означають, що навіть у жвавому міському середовищі сигнальні піки безпілотників досить чіткі, що робить цю технологію надійною. Технологія перевірена, масштабована і в цілому безпечна.	Сигнали можуть бути навмисно або ненавмисно перехоплені за допомогою засобів глушіння сигналів. Сигнал має обмежений радіус дії і повинен працювати в межах прямої видимості.

2. 4G зв'язок з використанням однієї або декількох SIM-карт: ліцензовані та регульовані стільникові мережі пропонують модулі та мережеві послуги 4G. Вони забезпечують широке покриття та рівномірну якість.

Переваги	Недоліки
З'єднання 4G дозволяє передавати дані швидше і в більших обсягах, ніж попередні покоління мережевих послуг. Ці послуги пропонують хороший радіус дії на великих відстанях, за умови, що територія покрита достатньою кількістю веж стільникового зв'язку.	Віддалені території можуть бути недостатньо або зовсім не покриті стільниковим зв'язком, використання БА з цим методом зв'язку обмежене або неможливе.

### 3. Супутниковий зв'язок

Переваги	Недоліки
Супутникові технології забезпечують глобальний постійний зв'язок. Покриття дуже широке, а час безвідмовної роботи стабільно високий.	Наразі технологія супутникового зв'язку в основному використовується у великих БПЛА військового типу, які літають на великі відстані і висоти. Комерційні дрони поки що не мають життєздатного рішення, яке б включало супутниковий зв'язок.

4. 5G зв'язок: технологія, що забезпечує швидкість передачі даних у сотні разів вищу, ніж її попередник 4G.

Переваги	Недоліки
Ідеально підходить для завдань з високими ресурсними запитами, таких як передача відео високої чіткості в реальному часі. Він має кращі показники затримки та швидкості передачі даних, ніж попередні покоління.	Будь-яка залежність від однієї лінії зв'язку 5G є небезпечною, особливо при низькому покритті. Це означає, що операції в сільській місцевості будуть під загрозою. Щоб дрони могли ефективно використовувати мережу 5G, покриття має бути всеосяжним, що на даний момент далеко від реальності.

### Компоненти архітектури IoD

Коли виконання завдання потребує створення системи з роїв БА, симбіотично взаємодіючих для виконання спільної мети, на допомогу приходить Internet of Drones (IoD). IoD - це об'єднана мережа дронів, яка використовує існуючу інфраструктуру Інтернету речей (IoT) для полегшення виконання місій за допомогою передачі даних і навігаційних послуг в режимі реального часу.

IoD може відрізнитися в залежності від архітектури, проміжного ПЗ, методів інтеграції та спільного використання даних та безпеки. Основою архітектури IoD є два основні елементи: компоненти архітектури та протоколи зв'язку. Архітектура IoD відіграє життєво важливу роль у контролі та адмініструванні БА для більш ефективного виконання їх роботи [24].

1. Архітектурні елементи (компоненти): архітектура IoD містить низку компонентів IoT такі як сенсори, хмарні платформи, зв'язок тощо. Роль та операції цих компонентів залежать від їхньої взаємодії з архітектурою IoD. Стабільність, збір даних і методи комунікації в IoD визначаються компонентами його архітектури [25]. Компоненти архітектури IoD призначені для виконання операцій, головним чином пов'язаних із прийняттям рішень та управлінням дронами, а також забезпеченням того, щоб дані досягали правильного місця призначення від вузлів-джерел [26].

2. Протоколи зв'язку: IoD дозволяє використовувати різні протоколів зв'язку для підтримки та передачі даних між вузлами. Наприклад, одними із застосовуваних протоколів зв'язку є протоколи MAVLink і ROSLink. MAVLink - це полегшений протокол маршрутизації повідомлень, а ROSLink - протокол інтегрований з операційною системою робота (Robot Operating System), яка забезпечує підключення роботів до IoT [27]. Ефективність протоколу зв'язку обумовлюється переміщенням носіїв та їх активністю в мережі [28]. Протокол зв'язку для IoD повинен бути швидкодіючим в питаннях маршрутизації, де передача даних між вузлами-джерелами та вузлами-цільми є критично важливою [29].

У середовищі підключених апаратів IoD рівень проміжного програмного забезпечення відіграє важливу роль, функціонуючи як посередник між різними вузлами та додатками [30]. Рівень проміжного ПЗ забезпечує взаємодію між різними інтерфейсами IoD, а саме мовою програмування, операційною системою, мережами та архітектурою [31]. Існує розглядаються два підходи до проміжного програмних забезпечення - сервісне та хмарне.

1. Проміжне ПЗ на основі сервісів: полегшує архітектурі IoD доступ до мережі, локальну доставку повідомлень, кешування та вирішення імен. Сервісне проміжне ПЗ може забезпечити надійний зв'язок для всієї архітектури IoD [32]. Крім того, воно може добре інтегруватися з іншими мережевими рівнями для забезпечення ефективної співпраці, продуктивності та адаптивності до архітектури. Проміжне ПЗ на основі сервісів може допомогти забезпечити ефективну передачу даних і забезпечити тривалий час з'єднання між мережевими комунікаціями [33].

2. Хмарне проміжне ПЗ: дозволяє різноманітним додаткам інтегрувати свої операції в мережеву архітектуру. Найбільш поширеним проміжним ПЗ в робототехніці є ROS (Robot Operating System), яка вивантажує обчислення і обробку в хмару для ефективного використання ресурсів. Цей процес отримав назву хмарної робототехніки [34]. Хмарне проміжне ПЗ забезпечує ефективний зв'язок між наземною мережею та БА. Хмарне проміжне ПЗ забезпечує дуже швидко реакцію на запитуваний сервіс. Крім того, це дає змогу IoD активно взаємодіяти з іншими мережами.

Інтеграція та спільне використання даних дозволяє обробляти і об'єднувати кілька джерел даних для отримання правильної інформації для прийняття рішень. Крім того, алгоритми на основі злиття даних для роїв додатково підтримують більш ефективну роботу в інтелектуальному середовищі. У цьому підрозділі буде розглянуто три різні типи об'єднання і спільного використання даних для IoD, а саме: розподілений, централізований і хмарний.

1. Розподілене використання даних: децентралізує дані в локальну взаємодію, і жодні компоненти не є важливими для будь-якої іншої операції, що дає кілька переваг для роботи IoD, а саме: масштабованість, відмовостійкість, сумісність і легкість перепроєктування [35]. Ці переваги допомагають

переналаштувати або видалити конкретний недоступний або відключений дрон з мережі. Крім того, розподілене середовище зручніше для самостійного прийняття рішень, а в разі надзвичайної ситуації може працювати в режимі спільного використання.

2. Централізоване використання даних: потребує потужного комунікаційного обладнання для безперервного виконання операцій. В такому механізмі вся інформація розподіляється через центр злиття з іншими пристроями в мережі, що забезпечує надання більш точної інформації про операцію [36]. На ранній стадії розгортання і роботи на коротких відстанях централізований обмін даними є більш ефективним. Однак, коли мова йде про більші відстані і пізніші етапи операцій, передислокувати пристрій або керувати ним буде набагато складніше [37].

3. Хмарне використання даних: повністю контролюється хмарними інтерфейсами, які об'єднують різні сервіси, щоб допомогти клієнту прийняти ефективне рішення. Крім того, в архітектурі можуть бути реалізовані такі послуги, як аналітика та інтелектуальне управління. Розроблені фреймворки для інтеграції різних джерел для управління дорожнім рухом в додатках розумних міст використовують хмарне злиття даних. Крім того, ці фреймворки пропонують послуги з безпеки, уникнення зіткнень та навігації з урахуванням ризиків [38].

На основі проведеного аналізу БПЛА та БПНА можна зробити висновок про те, що БА можуть виконувати широкий спектр задач включаючи моніторинг екологічно-критичних об'єктів. Користуючись досягненнями в області інженерії БА можна обрати конструкцію БА відповідно до середовища та специфіки виконуваного завдання. Розвиток сенсорів, машинного навчання та алгоритмів розпізнавання надає можливості ефективного моніторингу та ідентифікації об'єктів. В свою чергу, технологія ІoD дозволяє об'єднувати різні БА в рої дронів, створюючи корисні симбіози для виконання спільних місій.

Відповідно рішень проаналізованих в цьому пункті в наступному пункті будуть запропоновані можливі варіанти БА та БЛМНС, які б могли виконувати задачі моніторингу екологічно-критичної інфраструктури.

#### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для того, щоб обрати оптимальні варіанти побудови БЛМНС необхідно визначити конкретну задачу для якої буде використовуватися система, та провести детальний аналіз вимог [39, 40]. Це включає:

1. Оцінку середовища експлуатації: Визначення умов, у яких буде працювати система, таких як тип місцевості, кліматичні умови, можливі перешкоди та ризики.
2. Технічні вимоги: Визначення необхідних технічних характеристик БА.
3. Вимоги до комунікацій: Визначення методів передачі даних між БА.
4. Інтеграція та сумісність: Огляд можливостей інтеграції системи з існуючими технологіями та платформами.

Як потенційну задачу для БЛМНС будемо вважати моніторинг уявного торфовища. Відштовхуючись від задачі та можливого місця її виконання можна продовжити аналіз вимог.

Оцінка середовища експлуатації: торфовище площею 30га, пересічена рівна місцевість, помірний клімат.

Технічні вимоги: камера високої роздільної здатності, тепловізор, тривалість роботи від 2-х годин, вантажопідйомність для БПНА від 90кг.

Вимоги до комунікацій: радіочастотний зв'язок між БПЛА та БПНА.

Інтеграція та сумісність: інтеграція технології розпізнавання .

#### Огляд побудови БПЛА

Для вибору конструкції БПЛА необхідно проаналізувати специфіку території та задачі моніторингу. Так як місцевість пересічена, то можна припустити про відсутність взлітної смуги, отже БПЛА повинен робити вертикальний взліт та посадку. БПЛА має бути оснащений камерою та тепловізором та мати змогу фокусуватися над містом пожежі для її контролю.

Таблиця 1

Аналіз властивостей БПЛА

Властивість/Тип БПЛА	Однороторний	Квадрокоптер	Жорстке крило	Гібридний
Достатня підйомна сила	✓	✓	✓	✓
Вертикальний зліт/посадка	✓	✓		✓
Маневреність		✓		✓
Швидкість польоту	✓	✓	✓	✓
Тривалість польоту	✓	✓	✓	✓

Властивість/Тип БПЛА	Однороторний	Квадрокоптер	Жорстке крило	Гібридний
Нескладна механіка		✓	✓	
Результат	4	6	4	5

Згідно з виконаним аналізом приходимо до висновку, що оптимальним вибором БПЛА для виконання моніторингу в цій місцевості буде квадрокоптер, адже він відповідає усім необхідним критеріям.

#### Огляд побудови БПНА

Враховуючи специфіку місцевості та виконуваного завдання можна визначити тип використовуваного БПНА аналогічно тому, як це було зроблено в попередньому підрозділі. Необхідно враховувати, що БПНА повинен мати високу прохідну спроможність та високу підйомну силу для транспортування засобів гасіння пожежі.

Таблиця 2

#### Аналіз властивостей БПНА

Властивість/Тип БПНА	Колісний	Гусеничний	На ногах	Стрибаючий
Достатня вантажопідйомність	✓	✓		
Висока прохідна можливість		✓	✓	
Маневреність	✓	✓	✓	
Швидкість	✓	✓	✓	✓
Час автономної роботи	✓	✓		✓
Нескладна механіка	✓	✓		
Результат	5	6	3	2

Зважаючи на потребу у підвищеній прохідності, гусеничний БПЛА має перевагу над колісним, тому він найкраще підходить для виконання такого завдання.

#### Комбінування БПЛА та БПНА для виконання сумісних завдань

Комбінування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та безпілотних наземних апаратів (БПНА) дозволяє створити ефективну систему для комплексного моніторингу та реагування на надзвичайні ситуації в екологічно-критичних об'єктах. Такий підхід забезпечує інтеграцію переваг кожного типу апаратів, підвищуючи загальну ефективність та надійність системи [41]. Використовуючи таблиці 1 та 2 можна можна співставити БА, об'єднавши апарати, які можуть доповнювати один одного в складі БЛМНС. В результаті ми отримуємо різні конфігурації здатні для виконання різних завдань.

Таблиця 3

#### Варіанти можливих конфігурацій БЛМНС

№ Конфігурації	Тип БПЛА	Типа БПНА	Переваги	Недоліки	Можливе застосування
1	Квадрокоптер	Гусеничний	Висока маневреність, проходимість, вантажопідйомність	Обмежена тривалість польоту	Моніторинг та гасіння пожеж
2	Жорстке крило	Колісний	Висока швидкість, велика тривалість польоту	Потреба у злітно-посадній смузі, рівна поверхня	Інспекція інфраструктури
3	Гібридний апарат	Робот на ногах	Проходимість та універсальність	Вартість, вантажопідйомність, швидкість, складність	Моніторинг важкодоступних територій

Конфігурація 1 підходить для заданої задачі моніторингу та керування пожежами на торфовищах. Ця конфігурація з квадрокоптера та гусеничного апарату буде розглянута більш детально. БА в цій БЛМНС можуть виконувати наступні функції:

1. Квадрокоптер з камерою та тепловізором:
  - Моніторинг з повітря: Використання квадрокоптера для регулярного обльоту території, виявлення теплових аномалій, диму або інших ознак небезпеки.
  - Оперативне реагування: Виявлення аномалій у реальному часі та передача даних на станцію управління та БПНА для подальших дій.
2. Гусеничний наземний апарат з системою гасіння пожеж:
  - Реагування на землі: Після отримання координат від квадрокоптера, гусеничний апарат рухається до проблемної ділянки для детального огляду та виконання необхідних дій.
  - Гасіння пожеж: Використання системи гасіння пожеж для ліквідації вогню.

#### Використання ІоД для створення БЛМНС

Для взаємодії багатьох БА при виконанні сумісної місії може використовуватися ІоД з хмарним розподіленням даних та використанням протоколу зв'язку ROSLink. Дані рішення можуть обраними так як вони відповідають специфіці виконуваної задачі та мають низку переваг:

1. Впровадження ROSLink:
  - ROSLink дозволяє ефективно інтегрувати роботів, обладнаних ROS, з ІоТ [42].
  - ROSLink забезпечує доступ до будь-якого робота через Інтернет за допомогою легкого асинхронного комунікаційного протоколу.
2. Переваги хмарного розподілення даних:
  - Віртуалізація роботів та їх управління через Інтернет відкриває нові можливості для хмарних робототехнічних додатків.
  - Перенесення інтенсивних обчислень до хмарних ресурсів дозволяє подолати обмеження щодо обчислювальних потужностей, зберігання та енергоспоживання роботів.
3. Ефективність та надійність:
  - Тести ROSLink у хмарі показали його ефективність та надійність для керування роботами через Інтернет.
  - Використання високошвидкісних з'єднань та достатньої пропускної здатності сучасного Інтернету дозволяє забезпечити високу якість обслуговування для додатків, розгорнутих за допомогою ROSLink.
4. Масштабованість та гнучкість:
  - ROSLink дозволяє легко масштабувати систему, забезпечуючи можливість додавання нових роботів та користувачів без значних змін у її архітектурі.



Рис. 1 Схема взаємодії БЛМНС

#### Алгоритм роботи БЛМНС

Процес спільної роботи наведених вище безпілотних апаратів може виглядати так:

1. Виявлення проблеми:
  - Квадрокоптер здійснює обліт території та за допомогою камер і тепловізорів виявляє потенційні проблеми (наприклад, підвищення температури, задимлення).
  - Дані з квадрокоптера передаються в реальному часі на центральну станцію управління.
2. Аналіз та планування:
  - Оператори на станції управління аналізують отримані дані та визначають необхідні дії.
  - Визначаються координати проблемної ділянки та план дій для наземного апарату.

3. Реагування на землі:

- Гусеничний апарат отримує координати проблемної ділянки та вирушає на місце.
- Виконується детальний огляд території за допомогою камер та сенсорів на гусеничному апараті.
- Використовується система гасіння пожеж для ліквідації вогню або роботизована рука для виконання інших необхідних дій.

4. Оцінка результатів:

- Після завершення операції квадрокоптер знову облітає територію для оцінки результатів виконаної роботи.
- Дані передаються на центральну станцію для аналізу та підтвердження успішності операції.

**Алгоритм розпізнавання вогню та диму Fire-YOLO**

Для успішного виявлення пожежі окрім камери та тепловізору необхідний і алгоритм, який міг би проаналізувати отримане зображення та зробити висновки щодо наявності або відсутності пожежі в зоні моніторингу. Для вирішення цієї задачі може бути використаний алгоритм YOLO [43].

YOLO (You Look Only Once) - це алгоритм виявлення об'єктів у реальному часі, розроблений Джозефом Редмоном та Алі Фархаді у 2015 році. Це одноетапний детектор об'єктів, який використовує згорткову нейронну мережу (CNN) для прогнозування обмежувальних рамок та ймовірностей класів об'єктів на вхідних зображеннях.

Fire-YOLO є полегшеною версією алгоритму YOLO. В той час, як YOLO може працювати з 9000 тисячами класів, Fire-YOLO зосереджений на роботі з двома класами - дим та вогонь, і відповідно пропонує покращену швидкодію.

Виявлення класів Fire-YOLO алгоритмом виконується в декілька кроків.

По-перше, зображення буде поділено на сітку з клітинками розміру  $S \times S$  утворюючи вихідний тензор. Кожна клітинка може містити декілька об'єктів.



Рис. 2 Поділ вхідного зображення на  $S \times S$  клітин

Після цього визначається, чи є дим чи полум'я всередині кожної окремої клітини. Потім кожна клітина прогнозує три межові рамки (прямокутне утворення з декількох клітин в якому міститься об'єкт) і дає оцінку достовірностей цих межових рамок. Для цього кожній клітині вихідного тензору повинен бути співставлений вектор розміру  $B \cdot (5 + C)$ , де  $B$  - це кількість межових рамок, 5 - чотири координати межових рамок та один показник впевненості,  $C$  - кількість класів.

Загальна формула розміру вихідного тензору буде виглядати так:  $S \times S \times (B \cdot 5 + C)$ . Після цього застосовуються функції втрат, які допомагають отримати межові рамки зі значеннями вирогідності наявності об'єкта та певного класу [43]:



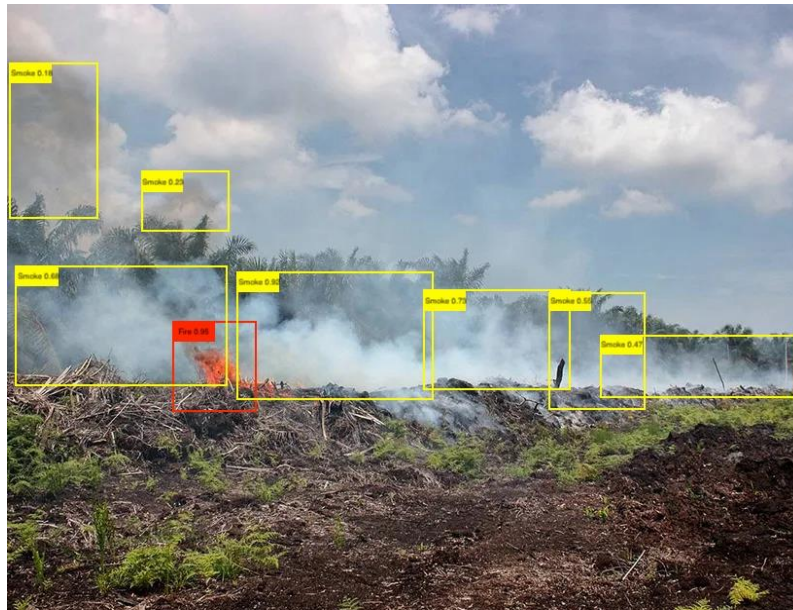


Рис. 3 Вихідне зображення з межовими рамками та визначеними класами

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В процесі роботи були досліджені можливості БПЛА та БПНА для задач моніторингу екологічно-критичних об'єктів в складі БЛМНС. В ході роботи були розглянуті різні типи БА та проведено аналіз їх можливостей для виконання задач моніторингу. Квадрокоптер на гученичний апарат виявились найбільш придатними для задач повітряного та наземного моніторингу.

В ході аналізу дотичних робіт було виявлено, що використання БЛМНС може бути ефективнішим, ніж використання поодинокого БА [9]. Інтеграція різних типів БА дозволяє створити ефективні, адаптивні системи, що можуть оперативно реагувати на змінні умови та виявлені загрози. Виявлено, що комбінація БПЛА та БПНА забезпечує підвищену ефективність моніторингу та реагування завдяки інтеграції переваг кожного типу апаратів. Це включає використання квадрокоптерів для повітряного огляду та гусеничних апаратів для детального наземного аналізу та гасіння пожеж.

В ході роботи були розглянуті можливі методи взаємодії БА в БЛМНС. Було розглянуто можливості IoD з хмарним розподіленням даних та протокол ROSLink для комунікації приладів в системі.

Був досліджений алгоритм та математичний апарат розпізнавання об'єктів YOLO. Фреймворк YOLO-Fire вважається одним з найефективніших алгоритмів для ідентифікації пожеж та може бути використаний для задач моніторингу.

Загалом, проведене дослідження підтвердило високий потенціал використання БЛМНС для задач моніторингу екологічно-критичних об'єктів та запропонувало один із можливих варіантів такої системи.

Майбутні дослідження та розробки в сфері БЛМНС можуть зосередитися на:

1. Розвитку автономності: Підвищення рівня автономності безпілотних апаратів для зменшення залежності від людського фактора.
  2. Забезпеченню безпеки: Розробка і впровадження нових методів захисту даних та систем від кіберзагроз.
  3. Ефективному управлінні ресурсами: Оптимізація використання енергетичних і обчислювальних ресурсів для підвищення ефективності системи.
  4. Інтеграція з іншими системами: Забезпечення сумісності та інтеграції БЛМНС з іншими існуючими системами моніторингу та управління.
  5. Покращення показників ефективності: Час реакції, точність моніторингу, стійкість системи тощо.
- Це сприятиме підвищенню якості моніторингу та швидкості реагування на надзвичайні ситуації, що в свою чергу покращить захист навколишнього середовища та безпеку населення.

#### Література

1. Бондар Д.В., Гурник А.В., Литовченко А.О., Хижняк В.В., Шевченко В.Л., Ядченко Д.М. Застосування безпілотних авіаційних систем у сфері цивільного захисту. Київ : ГО «Європейська наукова платформа», 2022. С. 16-22.

2. Горішний Є., Міняйло А., Дмитренко Л. Екологічні ризики та битки доквіллю України внаслідок війни. Київ : Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз СБУ, 2023. DOI 10.31733/2078-3566-2023-4-76-83
3. Банчук М.В. Система моніторингу санітарно-епідеміологічної ситуації в Україні як один з найважливіших елементів стратегії державного управління з забезпечення здоров'я населення. Державне управління: удосконалення та розвиток № 10, 2011.
4. Клименко М.О., Прищепя А.М., Вознюк Н.М. Моніторинг доквілля. Київ : Академія, 2006. 360 с.
5. Skorobohatko, S., Fesenko, H., Kharchenko, V. et al. Architecture and Reliability Models of Hybrid Sensor Networks for Environmental and Emergency Monitoring Systems. *Cybern Syst Anal* 60, 293–304 (2024). DOI 10.1007/s10559-024-00670-x.
6. Leichenko, K. et al. Deployment of a UAV swarm-based LiFi network in the obstacle-ridden environment: algorithms of finding the path for UAV placement. *Radioelectronic and Computer Systems*, [S.l.], v. 2024, n. 1, p. 176-195, feb. 2024. DOI 10.32620/reks.2024.1.14.
7. Fesenko, H.; Illiashenko, O.; Kharchenko, V.; Kliushnikov, I.; Morozova, O.; Sachenko, A.; Skorobohatko, S. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring. *Drones* 2023, 7, 409. DOI 10.3390/drones7070409.
8. Louie, A.H. Relational biology of symbiosis. 2010. P. 1. DOI 10.1007/s10516-010-9117-9.
9. Borges, P.; Peynot, T.; Liang, S.; Arain, B.; Wildie, M.; Minareci, M.; Lichman, S.; Samvedi, G.; Sa, I.; Hudson, N.; et al. A Survey on Terrain Traversability Analysis for Autonomous Ground Vehicles: Methods, Sensors, and Challenges. *Field Robot.* 2022. pp. 1567-1627.
10. Lanctot, S.; Herkenhoff, B.; Hassanalіan, M. Unmanned Launching & Landing Rover (ULLR) for Moon and Martian Missions on Ice-Caps. In *Proceedings of the 2021 ASCEND Conference*, Las Vegas, NV, USA, 15–17 November 2021. DOI 10.2514/6.2021-4201.
11. John, T.S. Advancements in robotics and its future uses. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 2011. pp. 1–6.
12. Gonzalez-De-Santos, P.; Fernández, R.; Sepúlveda, D.; Navas, E.; Armada, M. Unmanned ground vehicles for smart farms. In *Agronomy-Climate Change and Food Security*; Intech UK: Horwich, UK, 2020. P. 73.
13. Michael R. Blackburn, Richard Bailey, Brent Lytle, "Improved mobility in a multi-degree-of-freedom unmanned ground vehicle," *Proc. SPIE 5422, Unmanned Ground Vehicle Technology VI*, (2 September 2004). DOI 10.1117/12.544715.
14. Herkenhoff, B.; Lanctot, S.; Bjorkman, T.; Serda, N.; Hassanalіan, M. Preliminary Design Concept of Locust Inspired Jumping Moon Robot Swarm. In *Proceedings of the AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum*, Virtual Event, 9–11 August 2021. P. 3270. DOI 10.2514/6.2021-3270.
15. Western, A.; Cervantes, R.; Dunning, C.; Haghshenas Jaryani, M.; Hassanalіan, M. Bioinspired Robot with Walking, Rolling, and Jumping Capabilities for Planetary Exploration. In *Proceedings of the AIAA Aviation 2021 Forum*, Virtual Event, 2–6 August 2021. P. 2784. DOI 10.2514/6.2021-2784.
16. Herkenhoff, B.K.; Lanctot, S.I.; Fisher, J.M.; Serda, N.; Bjorkman, T.S.; Martinez, V.; Johnsonand, T.; Davis, C.; Yazzie, T.; Vadiee, N.; et al. Preliminary Design Concept of Locust Inspired Jumping Moon Robot Swarm. In *Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference*, Online, 15–19 March 2021. P. 2754. DOI 10.2514/6.2021-3270.
17. Western, A.; Haghshenas-Jaryani, M.; Hassanalіan, M. Golden wheel spider-inspired rolling robots for planetary exploration. *Acta Astronaut.* 2022. pp. 34–48. DOI 10.1016/j.actaastro.2022.12.030.
18. Carlo, M.; Metin, S. A biomimetic climbing robot based on the gecko. *J. Bionic Eng.* 2006. pp. 115–125. DOI 10.1016/S1672-6529(06)60015-2.
19. Liu, GH., Lin, HY., Lin, HY. et al. A Bio-Inspired Hopping Kangaroo Robot with an Active Tail. *J Bionic Eng* 11. pp. 541–555 (2014). DOI 10.1016/S1672-6529(14)60066-4.
20. Darvishpoor, S.; Roshanian, J.; Raissi, A.; Hassanalіan, M. Classifications, configurations, and flight mechanisms of unmanned aerial systems: A review. *Prog. Aerosp. Sci.* 2021, 121, 100694. DOI 10.1016/j.paerosci.2020.100694.
21. Segui-Gasco, P.; Al-Rihani, Y.; Shin, H.S.; Savvaris, A. A Novel Actuation Concept for a Multi Rotor UAV. *J. Intell. Robot. Syst.* 2014. pp. 173–191.
22. Cai, G.; Lum, K.Y.; Chen, B.M.; Lee, T.H. A brief overview on miniature fixed-wing unmanned aerial vehicles. In *Proceedings of the IEEE ICCA 2010*, Xiamen, China, 9–11 June 2010. pp. 285–290.
23. Saeed, A.S.; Younes, A.B.; Cai, C.; Cai, G. A survey of hybrid Unmanned Aerial Vehicles. *Prog. Aerosp. Sci.* 2018. pp. 91–105.
24. Al-Ghafri, Y.; Asif, H.M.; Tarhuni, N.; Nadir, Z. Advancing Non-Line-of-Sight Communication: A Comprehensive Review of State-of-the-Art Technologies and the Role of Energy Harvesting. *Sensors* 2024, 24, 4671. DOI 10.3390/s24144671
25. Mohanta, K.; Al-Rubaye, S. Towards 6G Satellite–Terrestrial Networks: Analysis of Air Mobility Operations. *Electronics* 2024, 13, 2855. DOI 10.3390/electronics13142855.
26. Choudhary, G.; Sharma, V.; You, I. Sustainable and secure trajectories for the military Internet of Drones (IoD) through an efficient Medium Access Control (MAC) protocol. *Comput. Electr. Eng.* 2019. pp. 59–73. DOI 10.1016/j.compeleceng.2019.01.007.

27. Lagkas, T.; Argyriou, V.; Bibi, S.; Sarigiannidis, P. UAV IoT Framework Views and Challenges: Towards Protecting Drones as “Things”. *Sensors* 2018, 18, 4015. DOI 10.3390/s18114015.
28. M. Gharibi, R. Boutaba and S. L. Waslander, "Internet of Drones," in *IEEE Access*, vol. 4. pp. 1148-1162, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2537208.
29. Bousbaa, F.Z.; Kerrache, C.A.; Mahi, Z.; Tahari, A.E.K.; Lagraa, N.; Yagoubi, M.B. GeoUAVs: A new geocast routing protocol for fleet of UAVs. *Comput. Commun.* 2020. pp. 259–269. DOI 10.1016/j.comcom.2019.10.026.
30. A. I. A. Ahmed et al., "Service Management for IoT: Requirements, Taxonomy, Recent Advances and Open Research Challenges," in *IEEE Access*, vol. 7. pp. 155472-155488, 2019. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2948027.
31. Vallejo, D.; Castro-Schez, J.; Glez-Morcillo, C.; Albusac, J. Multi-agent architecture for information retrieval and intelligent monitoring by UAVs in known environments affected by catastrophes. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2020, 87, 103243. DOI 10.1016/j.engappai.2019.103243.
32. Juan López, Pablo Royo, Enric Pastor, Cristina Barrado, and Eduard Santamaria. 2007. A middleware architecture for unmanned aircraft avionics. In *Proceedings of the 2007 ACM/IFIP/USENIX international conference on Middleware companion (MC '07)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 24, 1–6. DOI 10.1145/1377943.1377962.
33. Sharma, V.; Kumar, R.; Patiala, P. Service-oriented middleware for multi-UAV guided ad hoc networks. *IT Converg. Pract.* 2014. pp. 24–33.
34. J. P. Ribeiro et al., "UAV cooperative perception based on DDS communications network," *OCEANS 2017 - Anchorage*, Anchorage, AK, USA, 2017. pp. 1-8.
35. S. Aggarwal, M. Shojafar, N. Kumar and M. Conti, "A New Secure Data Dissemination Model in Internet of Drones," *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Shanghai, China, 2019. pp. 1-6. DOI 10.1109/ICC.2019.8761372.
36. Xu, S.; Doğançay, K.; Hmam, H. Distributed pseudolinear estimation and UAV path optimization for 3D AOA target tracking. *Signal. Process.* 2017. pp. 64–78. DOI 10.1016/j.sigpro.2016.10.012.
37. Patra, A.N.; Regis, P.A.; Sengupta, S. Distributed allocation and dynamic reassignment of channels in UAV networks for wireless coverage. *Pervasive Mob. Comput.* 2019. pp. 58–70. DOI 10.1016/j.pmcj.2019.02.005.
38. Mohamed, N.; Al-Jaroodi, J.; Jawhar, I.; Idries, A.; Mohammed, F. Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 2018, 153, 119293. DOI 10.1016/j.techfore.2018.05.004.
39. Кобріна Н.В. Застосування безпілотних авіаційних комплексів для вирішення екологічних завдань. Харків : ДП “УКРНТЦ ЕНЕРГОСТАЛЬ”, 2014. С. 88-90.
40. Пітак І.В., Негадайлов А.А., Масікевич Ю.Г. Геоінформаційні технології в екології. Чернівці, 2012. С. 273.
41. Dinelli, C.; Racette, J.; Escarcega, M.; Lotero, S.; Gordon, J.; Montoya, J.; Dunaway, C.; Androulakis, V.; Khaniani, H.; Shao, S.; et al. Configurations and Applications of Multi-Agent Hybrid Drone/Unmanned Ground Vehicle for Underground Environments: A Review. *Drones* 2023, 7, 136. DOI 10.3390/drones7020136.
42. Koubaa, A.; Alajlan, M.; Qureshi, B. ROSLnk: Bridging ROS with the Internet-of-Things for cloud robotics. *Studies in Computational Intelligence*, 2017. DOI 10.1007/978-3-319-54927-9\_8.
43. Luan, T.; Zhou, S.; Zhang, G.; Song, Z.; Wu, J.; Pan, W. Enhanced Lightweight YOLOX for Small Object Wildfire Detection in UAV Imagery. *Sensors* 2024, 24, 2710. DOI 10.3390/s24092710.

## References

1. Bondar, D.V., Gurnik, A.V., Lytovchenko, A.O., Khizhnyak, V.V., Shevchenko, V.L., Yadchenko, D.M. Application of Unmanned Aerial Systems in Civil Protection. Kyiv: NGO "European Scientific Platform", 2022. pp. 16-22.
2. Horishniy, Y., Minyaylo, A., Dmytrenko, L. Environmental Risks and Damage to Ukraine's Environment as a Result of the War. Kyiv: Ukrainian Scientific Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of the Security Service of Ukraine, 2023. DOI: 10.31733/2078-3566-2023-4-76-83
3. Banchuk, M.V. The Monitoring System of the Sanitary and Epidemiological Situation in Ukraine as One of the Most Important Elements of the State Management Strategy for Ensuring Public Health. *Public Administration: Improvement and Development*, No. 10, 2011.
4. Klymenko, M.O., Pryshchepa, A.M., Vozniuk, N.M. Environmental Monitoring. Kyiv: Akademia, 2006. 360 pages. Skorobohatko, S., Fesenko, H., Kharchenko, V. et al. Architecture and Reliability Models of Hybrid Sensor Networks for Environmental and Emergency Monitoring Systems, 293–304 (2024). DOI 10.1007/s10559-024-00670-x.
5. Skorobohatko, S., Fesenko, H., Kharchenko, V. et al. Architecture and Reliability Models of Hybrid Sensor Networks for Environmental and Emergency Monitoring Systems. *Cybern Syst Anal* 60, 293–304 (2024). DOI 10.1007/s10559-024-00670-x.
6. Leichenko, K. et al. Deployment of a UAV swarm-based LiFi network in the obstacle-ridden environment: algorithms of finding the path for UAV placement. *Radioelectronic and Computer Systems, [S.I.]*, v. 2024, n. 1, p. 176-195, feb. 2024. DOI 10.32620/reks.2024.1.14.
7. Fesenko, H.; Iliashenko, O.; Kharchenko, V.; Kliushnikov, I.; Morozova, O.; Sachenko, A.; Skorobohatko, S. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring. *Drones* 2023, 7, 409. DOI 10.3390/drones7070409.
8. Louie, A.H. Relational biology of symbiosis. 2010. P. 1. DOI 10.1007/s10516-010-9117-9.
9. Borges, P.; Peynot, T.; Liang, S.; Arain, B.; Wildie, M.; Minareci, M.; Lichman, S.; Samvedi, G.; Sa, I.; Hudson, N.; et al. A Survey on Terrain Traversability Analysis for Autonomous Ground Vehicles: Methods, Sensors, and Challenges. *Field Robot.* 2022. pp. 1567-1627.
10. Lancot, S.; Herkenhoff, B.; Hassanalain, M. Unmanned Launching & Landing Rover (ULLR) for Moon and Martian Missions on Ice-Caps. In *Proceedings of the 2021 ASCEND Conference*, Las Vegas, NV, USA, 15–17 November 2021. DOI 10.2514/6.2021-4201.

11. John, T.S. Advancements in robotics and its future uses. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 2011. pp. 1–6.
12. Gonzalez-De-Santos, P.; Fernández, R.; Sepúlveda, D.; Navas, E.; Armada, M. Unmanned ground vehicles for smart farms. In *Agronomy-Climate Change and Food Security*; Intech UK: Horwich, UK, 2020. P. 73.
13. Michael R. Blackburn, Richard Bailey, Brent Lytle, "Improved mobility in a multi-degree-of-freedom unmanned ground vehicle," *Proc. SPIE 5422, Unmanned Ground Vehicle Technology VI*, (2 September 2004). DOI 10.1117/12.544715.
14. Herkenhoff, B.; Lanctot, S.; Bjorkman, T.; Serda, N.; Hassanalian, M. Preliminary Design Concept of Locust Inspired Jumping Moon Robot Swarm. In *Proceedings of the AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum, Virtual Event*, 9–11 August 2021. P. 3270. DOI 10.2514/6.2021-3270.
15. Western, A.; Cervantes, R.; Dunning, C.; Haghshenas Jaryani, M.; Hassanalian, M. Bioinspired Robot with Walking, Rolling, and Jumping Capabilities for Planetary Exploration. In *Proceedings of the AIAA Aviation 2021 Forum, Virtual Event*, 2–6 August 2021. P. 2784. DOI 10.2514/6.2021-2784.
16. Herkenhoff, B.K.; Lanctot, S.I.; Fisher, J.M.; Serda, N.; Bjorkman, T.S.; Martinez, V.; Johnsonand, T.; Davis, C.; Yazzie, T.; Vadiiee, N.; et al. Preliminary Design Concept of Locust Inspired Jumping Moon Robot Swarm. In *Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference, Online*, 15–19 March 2021. P. 2754. DOI 10.2514/6.2021-3270.
17. Western, A.; Haghshenas-Jaryani, M.; Hassanalian, M. Golden wheel spider-inspired rolling robots for planetary exploration. *Acta Astronaut.* 2022. pp. 34–48. DOI 10.1016/j.actaastro.2022.12.030.
18. Carlo, M.; Metin, S. A biomimetic climbing robot based on the gecko. *J. Bionic Eng.* 2006. pp. 115–125. DOI 10.1016/S1672-6529(06)60015-2.
19. Liu, GH., Lin, HY., Lin, HY. et al. A Bio-Inspired Hopping Kangaroo Robot with an Active Tail. *J. Bionic Eng.* 11. pp. 541–555 (2014). DOI 10.1016/S1672-6529(14)60066-4.
20. Darvishpoor, S.; Roshanian, J.; Raissi, A.; Hassanalian, M. Classifications, configurations, and flight mechanisms of unmanned aerial systems: A review. *Prog. Aerosp. Sci.* 2021, 121, 100694. DOI 10.1016/j.paerosci.2020.100694.
21. Segui-Gasco, P.; Al-Rihani, Y.; Shin, H.S.; Savvaris, A. A Novel Actuation Concept for a Multi Rotor UAV. *J. Intell. Robot. Syst.* 2014. pp. 173–191.
22. Cai, G.; Lum, K.Y.; Chen, B.M.; Lee, T.H. A brief overview on miniature fixed-wing unmanned aerial vehicles. In *Proceedings of the IEEE ICCA 2010, Xiamen, China*, 9–11 June 2010. pp. 285–290.
23. Saeed, A.S.; Younes, A.B.; Cai, C.; Cai, G. A survey of hybrid Unmanned Aerial Vehicles. *Prog. Aerosp. Sci.* 2018. pp. 91–105.
24. Al-Ghafri, Y.; Asif, H.M.; Tarhuni, N.; Nadir, Z. Advancing Non-Line-of-Sight Communication: A Comprehensive Review of State-of-the-Art Technologies and the Role of Energy Harvesting. *Sensors* 2024, 24, 4671. DOI 0.3390/s24144671
25. Mohanta, K.; Al-Rubaye, S. Towards 6G Satellite–Terrestrial Networks: Analysis of Air Mobility Operations. *Electronics* 2024, 13, 2855. DOI 10.3390/electronics13142855.
26. Choudhary, G.; Sharma, V.; You, I. Sustainable and secure trajectories for the military Internet of Drones (IoD) through an efficient Medium Access Control (MAC) protocol. *Comput. Electr. Eng.* 2019. pp. 59–73. DOI 10.1016/j.compeleceng.2019.01.007.
27. Lagkas, T.; Argyriou, V.; Bibi, S.; Sarigiannidis, P. UAV IoT Framework Views and Challenges: Towards Protecting Drones as “Things”. *Sensors* 2018, 18, 4015. DOI 10.3390/s18114015.
28. M. Gharibi, R. Boutaba and S. L. Waslander, "Internet of Drones," in *IEEE Access*, vol. 4. pp. 1148-1162, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2537208.
29. Bousbaa, F.Z.; Kerrache, C.A.; Mahi, Z.; Tahari, A.E.K.; Lagraa, N.; Yagoubi, M.B. GeoUAVs: A new geocast routing protocol for fleet of UAVs. *Comput. Commun.* 2020. pp. 259–269. DOI 10.1016/j.comcom.2019.10.026.
30. A. I. A. Ahmed et al., "Service Management for IoT: Requirements, Taxonomy, Recent Advances and Open Research Challenges," in *IEEE Access*, vol. 7. pp. 155472-155488, 2019. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2948027.
31. Vallejo, D.; Castro-Schez, J.; Glez-Morcillo, C.; Albusac, J. Multi-agent architecture for information retrieval and intelligent monitoring by UAVs in known environments affected by catastrophes. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2020, 87, 103243. DOI 10.1016/j.engappai.2019.103243.
32. Juan López, Pablo Royo, Enric Pastor, Cristina Barrado, and Eduard Santamaria. 2007. A middleware architecture for unmanned aircraft avionics. In *Proceedings of the 2007 ACM/IFIP/USENIX international conference on Middleware companion (MC '07)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 24, 1–6. DOI 10.1145/1377943.1377962.
33. Sharma, V.; Kumar, R.; Patiala, P. Service-oriented middleware for multi-UAV guided ad hoc networks. *IT Converg. Pract.* 2014. pp. 24–33.
34. J. P. Ribeiro et al., "UAV cooperative perception based on DDS communications network," *OCEANS 2017 - Anchorage*, Anchorage, AK, USA, 2017. pp. 1-8.
35. S. Aggarwal, M. Shojafar, N. Kumar and M. Conti, "A New Secure Data Dissemination Model in Internet of Drones," *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Shanghai, China, 2019. pp. 1-6. DOI 10.1109/ICC.2019.8761372.
36. Xu, S.; Doğançay, K.; Hmam, H. Distributed pseudolinear estimation and UAV path optimization for 3D AOA target tracking. *Signal. Process.* 2017. pp. 64–78. DOI 10.1016/j.sigpro.2016.10.012.
37. Patra, A.N.; Regis, P.A.; Sengupta, S. Distributed allocation and dynamic reassignment of channels in UAV networks for wireless coverage. *Pervasive Mob. Comput.* 2019. pp. 58–70. DOI 10.1016/j.pmcj.2019.02.005.
38. Mohamed, N.; Al-Jaroodi, J.; Jawhar, I.; Idries, A.; Mohammed, F. Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 2018, 153, 119293. DOI 10.1016/j.techfore.2018.05.004.
39. Kobrina, N.V. Application of Unmanned Aerial Complexes for Solving Environmental Tasks. Kharkiv: State Enterprise "Ukrainian Scientific and Technical Center ENERGOSTAL", 2014. pp. 88-90.
40. Pitak, I.V., Negadaylov, A.A., Masikevich, Y.G. Geoinformation Technologies in Ecology. Chernivtsi, 2012. p. 273. Dinelli, C.; Racette, J.; Escarcega, M.; Lotero, S.; Gordon, J.; Montoya, J.; Dunaway, C.; Androulakis, V.; Khaniani, H.; Shao, S.; et al. Configurations and Applications of Multi-Agent Hybrid Drone/Unmanned Ground Vehicle for Underground Environments: A Review. *Drones* 2023, 7, 136. DOI 10.3390/drones7020136.
41. Dinelli, C.; Racette, J.; Escarcega, M.; Lotero, S.; Gordon, J.; Montoya, J.; Dunaway, C.; Androulakis, V.; Khaniani, H.; Shao, S.; et al. Configurations and Applications of Multi-Agent Hybrid Drone/Unmanned Ground Vehicle for Underground Environments: A Review. *Drones* 2023, 7, 136. DOI 10.3390/drones7020136.
42. Koubaa, A.; Alajlan, M.; Qureshi, B. ROSLnk: Bridging ROS with the Internet-of-Things for cloud robotics. *Studies in Computational Intelligence*, 2017. DOI 10.1007/978-3-319-54927-9\_8.
43. Luan, T.; Zhou, S.; Zhang, G.; Song, Z.; Wu, J.; Pan, W. Enhanced Lightweight YOLOX for Small Object Wildfire Detection in UAV Imagery. *Sensors* 2024, 24, 2710. DOI 10.3390/s24092710.