

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою

Петриловський Ярослав Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Аналіз та адаптація методів виявлення безпілотних літальних апаратів із
застосуванням LiDAR-технологій

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня

Я.М. Петриловський

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Олеськів Роксолана Євгенівна к.т.н, доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

геодезії та землеустрою

М.М. Приходько

(посада)

(підпис) (дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
Освітньо-професійна програма Геодезія та землеустрій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ГКЗ
Приходько М. М.

«__»_____ 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ
Петриловський Ярослав Миколайович

1. Тема роботи «Аналіз та адаптація методів виявлення безпілотних літальних апаратів із застосуванням LiDAR-технологій»

Керівник роботи доц. Олеськів Р.Є.

Наказ ректора від «13» травня_____ 2026 року № 358.

2. Термін подання студентом роботи – _____ 2026 року.

3. Вихідні дані до роботи:

Матеріали переддипломної практики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1. Основи технології LiDAR.

2. Архітектура та функціональні стійками LiDAR-системи.

3. Методи обробки даних LiDAR

5. Перелік графічного матеріалу:

1 Порівняльний аналіз технологій виявлення БПЛА .

2. Структура та принцип типового лідарного датчика .

3. Порівняльний аналіз лідарних датчиків на основі механізму сканування .

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Основи технології LiDAR.	Олеськів Р.Є.	
2	Архітектура та функціональні стійками LiDAR-системи	Олеськів Р.Є.	
3	Методи обробки даних LiDAR	Олеськів Р.Є.	

7. Дата видачі завдання – «01» березня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	Отримання завдання на виконання бакалаврської роботи. Опрацювання рекомендованої літератури.	01.03.25 15.03.25	
2	Складання попереднього плану та змісту бакалаврської роботи.	19.03.25 25.03.25	
3	Основи технології LiDAR.	26.03.25 12.04.25	
4	Архітектура та функціональні стійками LiDAR-системи	13.04.25 15.05.25	
5	Методи обробки даних LiDAR	16.05.25 18.05.25	
6	Оформлення бакалаврської роботи та додатків до неї, складання висновків.	19.05.25 31.05.25	

Студент

(підпис)

Петриловський Я.М.

(розшифровка підпису)

Керівник

(підпис)

Олеськів Р.Є

(розшифровка підпису)

Анотація

Розрахунково-пояснювальна записка: 63 сторінок тексту, 5 таблиць, 2 рисунка, 2 формули, використано 23 джерел інформації.

В умовах воєнного стану на території України проблема контролю повітряного простору та оперативного виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) набуває особливої актуальності.

Широке використання дронів як у цивільній, так і у військовій сферах зумовлює необхідність розроблення високоточних, надійних і стійких до зовнішніх впливів технологій їх виявлення та визначення просторового положення.

Одним із перспективних засобів розв'язання цієї задачі є технологія LiDAR (Light Detection and Ranging), яка забезпечує отримання детальної тривимірної інформації про навколишнє середовище незалежно від рівня природного освітлення та дозволяє формувати високоточні хмари точок для подальшого аналізу.

Метою бакалаврської роботи є дослідження сучасних методів виявлення безпілотних літальних апаратів із використанням LiDAR-технологій, аналіз ефективності алгоритмів обробки тривимірних даних та визначення перспектив їх застосування для забезпечення контролю повітряного простору в умовах воєнного стану.

Об'єктом дослідження є процес виявлення та локалізації безпілотних літальних апаратів у повітряному просторі.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технології виявлення БПЛА на основі даних LiDAR, а також способи обробки хмар точок із використанням методів машинного навчання та глибоких нейронних мереж.

У роботі виконано систематичний аналіз сучасних підходів до виявлення безпілотних літальних апаратів із застосуванням LiDAR-

технологій з урахуванням специфіки їх використання в умовах підвищених вимог до безпеки повітряного простору України.

Проаналізовано принципи функціонування LiDAR-систем, їх класифікацію за типом випромінювання, довжиною хвилі, способом сканування та методом формування сигналу.

Особливу увагу приділено методам обробки хмар точок, алгоритмам просторового виявлення об'єктів, а також сучасним підходам машинного навчання і глибоких нейронних мереж, що забезпечують автоматизоване розпізнавання малорозмірних повітряних цілей.

Проведено порівняльний аналіз систем, що базуються виключно на використанні LiDAR, із комплексними мультисенсорними рішеннями, які поєднують LiDAR із радіолокаційними, оптичними та тепловізійними засобами спостереження.

Визначено основні технічні обмеження існуючих методів, досліджено вплив завад, складність виявлення малогабаритних і високошвидкісних об'єктів та окреслено напрями підвищення ефективності систем виявлення БПЛА в умовах міської забудови.

Практична цінність роботи полягає в узагальненні сучасних підходів до використання LiDAR-технологій для виявлення безпілотних літальних апаратів, визначенні їх переваг, недоліків та перспектив розвитку.

Отримані результати можуть бути використані під час розроблення сучасних систем моніторингу повітряного простору, підвищення рівня захисту об'єктів критичної інфраструктури, а також створення інтегрованих геопросторових систем спостереження та підтримки прийняття рішень у сфері безпеки й оборони України.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; БПЛА; LiDAR; виявлення БПЛА; 3D-детекція; хмари точок; машинне навчання; глибоке навчання; повітряний простір.

Abstract

Calculation and explanatory note: 63 pages of text, 5 tables, 2 figures, 2 formulas, 23 sources of information used.

In conditions of martial law in the territory of Ukraine, the problem of airspace control and operational detection of unmanned aerial vehicles (UAVs) is becoming particularly urgent.

The widespread use of drones in both civil and military spheres necessitates the development of highly accurate, reliable and resistant to external influences technologies for their detection and determination of spatial position.

One of the promising means of solving this problem is LiDAR (Light Detection and Ranging) technology, which provides detailed three-dimensional information about the environment regardless of the level of natural lighting and allows you to form high-precision point clouds for further analysis.

The purpose of the bachelor's thesis is to study modern methods of detecting unmanned aerial vehicles using LiDAR technologies, analyze the effectiveness of three-dimensional data processing algorithms and determine the prospects for their application to ensure airspace control in martial law conditions.

The object of the study is the process of detecting and localizing unmanned aerial vehicles in airspace.

The subject of the study is methods, algorithms and technologies for detecting UAVs based on LiDAR data, as well as methods for processing point clouds using machine learning methods and deep neural networks.

The work provides a systematic analysis of modern approaches to detecting unmanned aerial vehicles using LiDAR technologies, taking into account the specifics of their use in conditions of increased requirements for the security of the airspace of Ukraine.

The principles of operation of LiDAR systems, their classification by type of radiation, wavelength, scanning method and signal formation method are analyzed.

Particular attention is paid to point cloud processing methods, spatial object detection algorithms, as well as modern approaches to machine learning and deep neural networks that provide automated recognition of small-sized air targets.

A comparative analysis of systems based exclusively on the use of LiDAR with complex multi-sensor solutions that combine LiDAR with radar, optical and thermal imaging surveillance equipment was carried out.

The main technical limitations of existing methods were identified, the influence of interference, the complexity of detecting small-sized and high-speed objects were investigated, and directions for increasing the efficiency of UAV detection systems in urban areas were outlined.

The practical value of the work lies in the generalization of modern approaches to the use of LiDAR technologies for detecting unmanned aerial vehicles, determining their advantages, disadvantages and development prospects.

The results obtained can be used in the development of modern airspace monitoring systems, increasing the level of protection of critical infrastructure facilities, as well as the creation of integrated geospatial surveillance and decision-making support systems in the security and defense of Ukraine.

Keywords: unmanned aerial vehicles; UAVs; LiDAR; UAV detection; 3D detection; point clouds; machine learning; deep learning; airspace.

ЗМІСТ

Вступ	9
1. Основи технології LiDAR	16
2. Архітектура та функціональні елементи LiDAR-системи	21
2.1 Класифікація та принципи роботи	25
3. Методи обробки даних LiDAR	35
3.1 Кластеризаційні підходи до аналізу хмар точок	35
3.2 Підходи глибокого навчання для обробки LiDAR-даних в умовах України	39
3.3 Реальне застосування LiDAR у поєднанні з глибоким навчанням	42
3.4 Об'єднання датчиків для підвищення ефективності виявлення БПЛА	46
3.4.1 Інтеграція LiDAR для надійного виявлення БПЛА в умовах відсутності GNSS	50
3.4.2 Проблеми виявлення БПЛА на основі мультисенсорної інтеграції	54
Висновок	58
Список використаної літератури	60

Вступ

Шалений розвиток технологій у царині безпілотних літальних апаратів (БПЛА) посприяв тому, що вони стали масово використовуватися у багатьох сферах — це і сільське господарство, і геодезія, і спостереження за довкіллям, а також логістика, медицина та індустрія дозволя.

В українських реаліях дрони активно залучаються для знімання з повітря, створення карт, огляду різноманітних об'єктів інфраструктури та виконання специфічних інженерних робіт.

Разом із тим, факт широкого розповсюдження як недорогих, так і технічно вдосконалених безпілотників, породжує нові проблеми, що стосуються забезпечення безпеки у повітряному просторі.

Під час воєнного стану небезпека застосування безпілотних апаратів з метою протизаконних дій чи диверсій відчутно підвищується.

Невеликі літальні апарати здатні залучатися для нелегального збору інформації, перевезення заборонених речовин чи предметів, або ж для організації нападів на об'єкти життєво важливої інфраструктури.

До того ж, нерегульовані польоти приватних дронів несуть загрозу для руху повітряного транспорту та функціонування об'єктів, що мають стратегічне значення.

У зв'язку з цим, оперативне знаходження, визначення та супровід апаратів, що викликають підозру, перетворюється на одне з головних і пріоритетних завдань, що стоять перед системами забезпечення безпеки.

Важливість наукових студій у цій сфері зумовлена низкою чинників:

- Потреба у надійному убезпеченні стратегічно важливих об'єктів – об'єктів критичної інфраструктури, енергетичних комплексів, транспортних розв'язок та військових фортифікацій;

- Забезпечення безпечної експлуатації цивільного повітряного флоту та недопущення небезпечного зближення повітряних суден у спільних просторах;
- Гарантування інформаційної та особистої недоторканності як громадян, так і різноманітних організацій;
- Необхідність впровадження передових геопросторових інструментів у вітчизняні системи для контролю за ситуацією у повітрі.

Водночас, ідентифікація малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) нашоюхується на низку технічних викликів.

Серед них – мініатюрні розміри цих пристроїв, їхня здатність до швидкої зміни траєкторії, різноманітність функціонального наповнення, важкі умови, в яких вони можуть оперувати (міська забудова, наявність бар'єрів, високий рівень шуму), а також неупинна еволюція дизайну дронів.

Усе це диктує необхідність використання комплексних, багатоступеневих та інженерно відпрацьованих способів виявлення.

Нинішні системи, призначені для знаходження безпілотних літальних апаратів, спираються на залучення різноманітних сенсорних засобів: це й станції радіолокації, приймачі радіохвиль, звукові комплекси, системи візуального й інфрачервоного спостереження, а також сканери на основі лазерної технології (LiDAR).

На практиці ж спостерігається зростаюче впровадження інтегрованих, мультисенсорних методик, завдяки яким досягається вища якість розпізнавання об'єктів та стабільність їхнього супроводження.

У Таблиці 1 представлена зіставна оцінка ключових методів виявлення безпілотних літальних апаратів, де зважено їхні сильні сторони, недоліки та потенціал використання у військових умовах на території України.

Таблиця 1 Порівняльний аналіз технологій виявлення БПЛА

Тип сенсора	Переваги	Обмеження	Найкращі сфери застосування
Радар	Виявлення на великій відстані; розрізнення БПЛА за мікродоплерівськими сигнатурами; стійкість до несприятливих погодних умов	Низька ефективна площа розсіювання (RCS) малих цілей; висока вартість; складність розгортання	Моніторинг аеропортів та військових зон; робота за складних погодних умов
Радіочастотні (RF) датчики	Виявлення сигналів керування; велика дальність дії; пасивний режим роботи	Залежність від активних передач; чутливість до шифрування та глушіння; неможливість виявлення повністю автономних БПЛА	Системи безпеки та спостереження
Акустичні сенсори	Низька вартість; енергоефективність; ефективні в умовах обмеженої прямої видимості (LoS)	Обмежена дальність та точність через вплив вітру та фонового шуму	Закриті приміщення, сільська місцевість, низькі висоти польоту, зони з обмеженою LoS
Візуальні камери	Детальна візуальна інформація; низька вартість; гнучкість застосування	Залежність від освітлення, погодних умов та прямої видимості; відсутність глибинної інформації	Виявлення у денний час; класифікація БПЛА
LiDAR	Високоточні тривимірні просторові дані; формування 3D-хмар точок	Нерегулярність та розрідженість даних; складність обробки; висока обчислювальна ресурсомісткість	Безпека повітряного простору; спостереження; автономна навігація; зони без доступу до GNSS

В умовах нинішнього воєнного стану на теренах України критично важливого значення набуває забезпечення технологій для швидкого виявлення та розпізнавання безпілотних літальних апаратів.

Серед різноманіття методів, саме радіолокаційні установки зберігають свою позицію серед найбільш дієвих інструментів моніторингу повітряного простору, оскільки вони здатні фіксувати об'єкти на великих дистанціях та працювати незмінно, незалежно від кліматичних умов.

Ключовою перевагою, яку надають радарні комплекси, є впровадження принципу мікродоплерівського зсуву.

Детальне вивчення модуляцій частоти, спричинених обертанням лопатей багатороторних дронів, дає змогу чітко диференціювати ці апарати від природних об'єктів, таких як птахи, повітряні кулі чи невеликі літальні апарати.

Завдяки такому методу, стає можливим виокремлення типових ознак руху безпілотників, що дає змогу проводити їх ідентифікацію миттєво.

Це має вирішальне значення для забезпечення безпеки об'єктів життєво важливої інфраструктури, аеропортів та стратегічно значущих територій.

Водночас, радіолокаційні станції не позбавлені недоліків.

Мала ефективна поверхня відбиття (ЕПР) невеликих апаратів зменшує відстань, з якої їх можна надійно виявити.

До того ж, ці системи зазвичай дорогі та їх розгортання є трудомістким процесом, що стає особливо помітним, коли потрібен швидкий запуск мобільних систем.

Радіочастотні (РЧ) датчики становлять вагомий складову до радарних систем, оскільки вони дають змогу досліджувати комунікаційні взаємодії між безпілотним літальним апаратом (БПЛА) та його оператором.

Останні наукові розробки свідчать про помітний поступ у використанні методологій машинного та глибокого навчання для інтерпретації спектральних властивостей радіопередач.

Архітектури, що базуються на багатоступеневому видобутку специфічних ознак та використанні залишкових нейронних мереж,

спроможні досягати високого рівня ідентифікації, навіть коли рівень шуму значно перевищує рівень корисного сигналу.

Деякі методи дають змогу виявити не лише сам літальний апарат без екіпажу, а й апаратуру для його дистанційного керування, що є ключовим для з'ясування позиції оператора.

У реальних системах забезпечення безпеки, як правило, застосовують поєднану стратегію, яка об'єднує як радіолокаційні, так і радіочастотні (РЧ) компоненти, забезпечуючи таким чином усебічний контроль за простором над головою.

Проте радіочастотні детектори зберігають свою прив'язаність до існування активного комунікаційного зв'язку.

Дрони ж, якими керують автономно і котрі не транслюють жодних сигналів, здатні уникнути виявлення.

Додатково, застосування шифрування, зміна робочих частот чи цілеспрямоване радіоперешкоджання зменшують корисність подібних рішень.

З огляду на це, РЧ-інструменти типово поєднують з іншими класами сенсорних технологій.

Методи акустичного детектування спираються на вивчення специфічних звукових відбитків, що генеруються двигунами та гвинтами безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Завдяки впровадженню глибоких нейромережових архітектур, якість ідентифікації суттєво зросла, уможливлючи чітке відділення звуку апарата від загального шуму оточення.

Експериментальні дані свідчать, що мережі згорткового типу демонструють відмінну продуктивність при класифікації апаратів мультироторного типу, особливо на невеликих дистанціях.

Проте можливості акустичних систем щодо виявлення на відстані лишаються лімітованими через такі фактори, як пориви вітру, міський шумовий фон та різноманітні погодні явища.

З огляду на це, вони найбільш виправдані для цілей локального моніторингу у ситуаціях, коли пряма видимість є обмеженою.

Системи ближнього спостереження оперують аналізом низки кадрів, задіюючи просторово-часові властивості та методики оптичного потоку.

Подібна методологія спроможна ідентифікувати незначні об'єкти, що переміщуються, на тлі заплутаного оточення.

У функціональних втіленнях цю проблему зазвичай розмежовують: спершу відбувається виявлення переміщення (наприклад, через методики вирахування нерухомих частин сцени), а потім слідує етап сортування, який реалізується за допомогою мереж глибокого навчання, таких як MobileNet чи подібних конструкцій.

Незважаючи на те, що візуальні датчики є досить поширеними та надають багато відомостей, їхня продуктивність сильно варіюється залежно від умов освітлення, метеорологічних чинників та можливості безперешкодного огляду.

Окрім того, звичайні фотоапарати не дають змоги прямо вимірювати відстань до того, чи щось знаходиться.

Натомість, доволі перспективним шляхом здається впровадження технології LiDAR, котра створює об'ємну "хмару" точок з усіма необхідними точними числовими характеристиками.

На противагу звичним камерам, LiDAR дає змогу безпосередньо визначати дистанцію та розташування об'єктів у просторі, завдяки чому можна виокремлювати невеликі об'єкти, що швидко рухаються, базуючись на їхніх формах та шляху переміщення.

Системи, що базуються на технології LiDAR, довели свою спроможність у процесах ідентифікації та відстеження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на дистанціях від невеликих до помірних.

До їхніх козирних рис належать першокласна здатність до розрізнення об'єктів у просторі та часі, а також робота без залежності від рівня наявності світла та висока витривалість у непростих екологічних умовах.

З огляду на це, подібні системи вважаються багатообіцяючим засобом для гарантування безпеки повітряного простору на території України.

Водночас, опрацювання масивів даних, отриманих за допомогою LiDAR, являє собою доволі непростий виклик.

Хмари точок, що утворюються, відзначаються певною рідкістю, нерівномірністю розташування елементів та надзвичайно високою багатовимірністю.

Аби їх ефективно проаналізувати, використовуються техніки кластеризації, поділу на сегменти та глибокого навчання; ці методи дають змогу автоматично ідентифікувати об'єкти та проводити їхню класифікацію.

Зв'язка LiDAR та моделей глибокого навчання розкриває свіжі перспективи для покращення точності та швидкодії систем, призначених для виявлення.

У межах цієї праці вивчаються актуальні методи застосування технологій LiDAR саме для завдань виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА), беручи до уваги потенціал їхньої взаємодії з радарними, радіочастотними та візуальними сенсорами.

1. Основи технології LiDAR

Система LiDAR (Light Detection and Ranging) відноситься до розряду активних технік збору даних з відстані, основний принцип роботи яких полягає у випромінюванні власного сигналу та подальшому дослідженні відгуку, отриманого від оточуючих об'єктів.

По суті, її ідея перегукується з концепцією радіолокації, однак замість застосування радіохвиль тут застосовується світлове, лазерне випромінювання.

Визначення відстані реалізується через фіксацію часового інтервалу, потрібного для проходження світлового спалаху від точки випромінювання до цілі та його подальшого повернення до приймального елемента.

Проте здатність світлодарів (LiDAR) не зводиться лише до вимірювання відстані.[10]

Зараз системи здатні будувати насичені тривимірні представлення оточення, випускаючи численні короткі лазерні спалахи та фіксуючи їх часові параметри надзвичайно точно.

Це дозволяє технології формувати багаті на деталі хмари точок, які відображають конфігурацію об'єктів та дають змогу реконструювати заплутані сцени майже миттєво.

Внаслідок цього LiDAR стає ключовим засобом для 3D-мапування, розробки інженерних проектів, нагляду за спорудами та вивчення просторових змін.

Переважає більшість сенсорів LiDAR функціонують у ближньому інфрачервоному спектрі, особливо на хвилях, що сягають приблизно 905 нанометрів.

Відстань визначається за допомогою логіки вимірювання часу, необхідного світлу для подолання шляху (Time of Flight, ToF).[7]

Основа цього підходу полягає у фіксації проміжку часу між початковим випромінюванням лазерного імпульсу (позначимо його як t_1) та моментом, коли цей імпульс повертається до приймача (t_2).

Якщо відома швидкість, з якою рухається світло, можна легко розрахувати дистанцію до об'єкта.

Найбазовіший спосіб застосування цієї ідеї — це пряме одноімпульсне вимірювання часу польоту (або dToF).

У цій конфігурації лазерний напівпровідник випромінює стрімкий імпульс, паралельно активуючи хронометр високої точності.

Коли промінь відбивається від поверхні цілі й резонує з фоточутливим компонентом, розміщеним близько до випромінювача, лічильник зупиняється.

Обчислений відрізок часу слугує основою для визначення просторового положення цієї конкретної точки.

З огляду на їхню швидкість та точність, системи LiDAR можуть здійснювати тисячі чи мільйони знімків щосекунди, набудовуючи деталізовані тривимірні образи оточення.

Це має першорядне значення для завдань, пов'язаних із відстеженням рухомих предметів, дослідженням заплутаної конфігурації та створенням електронних планів рельєфу.[10],[11]

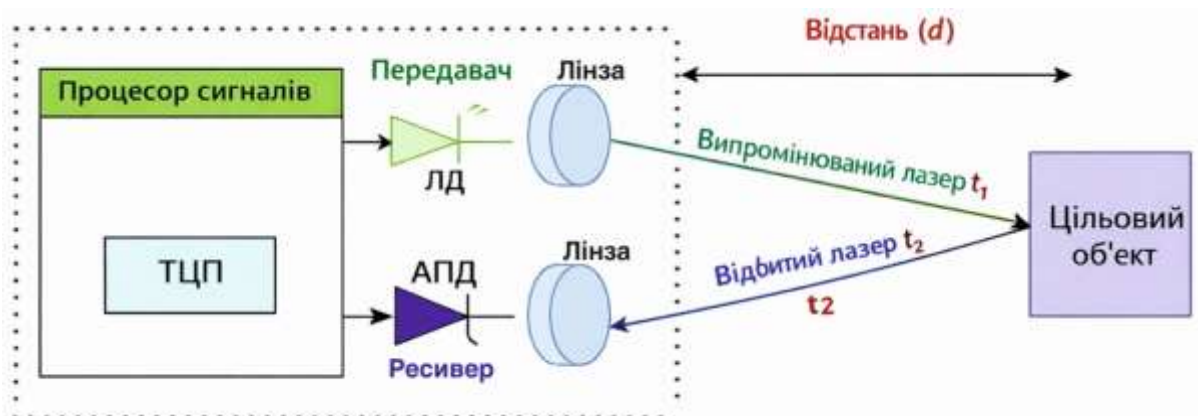


Рисунок 1. Структура та принцип типового лідарного датчика

Джерелом світла слугує лазерний діод, що продукує стислий світловий викид.

Цей викид скерується та збирається у фокус за допомогою лінзи передавального оптичного тракту.

Сформований лазерний промінь прямує до об'єкта дослідження; відтак, після контакту з його поверхнею, частина променя ретранслюється назад у напрямку приймального пристрою.

Сигнал, що повернувся, проходить через приймальну лінзову систему і фіксується лавинним фотодіодом, який здійснює перетворення світлового імпульсу на відповідний електричний відгук.

Наступним іде блок, що займається вимірюванням часу.

Його функцію виконує перетворювач часових інтервалів (скорочено TDC), котрий встановлює проміжок між моментом, коли лазерний діод послав імпульс, та моментом реєстрації цього імпульсу фотодіодом.

Власне цей часовий проміжок і є часом, який сигнал витратив на політ (відомий як ToF).

Зчитане значення часу польоту (ToF) надсилається до процесорного модуля, котрий, оперуючи відомим показником швидкості світла, визначає дистанцію між лідаром та об'єктом, на який він спрямований.

В умовах, коли часовий проміжок t між початковим та зворотним імпульсами зафіксовано, дистанція D до цілі вираховується за наступним співвідношенням:[10]

$$D = \frac{c \cdot t}{2}$$

де:

- D — відстань до цільового об'єкта, м;
- c — швидкість світла (приблизно 3×10^8 м/с у вакуумі);
- t — виміряний час проходження імпульсу «туди й назад»;

- ділення на 2 враховує подвійну довжину шляху сигналу.

Щоб забезпечити високу ступінь достовірності вимірювань у наявних польових умовах, необхідно вносити поправки, пов'язані з коливаннями температури, тиску й відносної вологості повітря.

Це зумовлено тим, що швидкість поширення світла крізь нашу атмосферу дещо відрізняється від його швидкості, встановленої для вакууму.[18]

Для забезпечення високої надійності результатів, отриманих у неідеальних атмосферних умовах, обов'язково слід брати до уваги вплив фізичних властивостей повітряного середовища.

Проходження світла крізь атмосферу відбувається з певним уповільненням порівняно з вакуумом, що залежить від коефіцієнта заломлення повітря, який, у свою чергу, формується під впливом таких факторів, як температура, атмосферний тиск та вміст води.

У нормальних умовах швидкість світла приймається рівною $c=3\cdot 10^8$ м/с, проте, коли світло рухається в атмосфері, його величина потребує корекції за допомогою певного коефіцієнта, що має пряму залежність від показника заломлення n :[10],[15]

$$c_{atm} = \frac{c}{n}$$

де:

- c_{atm} — швидкість світла в повітрі;
- c — швидкість світла у вакуумі;
- n — показник заломлення повітря.

Навіть крихітні зсуви у значенні показника заломлення здатні викликати накопичення помилок, коли йдеться про вимірювання на значних відстанях.

Візьмемо до прикладу, що коли температура повітря зростає, його густина падає, а це, своєю чергою, змінює величину n , і, як наслідок, отримуваний розрахунок відстані.

Подібний вплив мають коливання атмосферного тиску та відносної вологості.

Для потреб, пов'язаних з інженерією та геодезією, коли необхідна точність на рівні сантиметрів чи міліметрів, застосовують такий набір інструментів та методів:

- Прилади для збору метеорологічних даних, що дають можливість фіксувати умови навколишнього середовища безпосередньо в момент вимірювання;
- Формальні математичні конструкції для коригування коефіцієнта заломлення;
- Програмне забезпечення LiDAR, що містить інтегровані, повністю автономні механізми для урахування та виправлення впливу температури під час обчислювальних процесів.

Ці корективи стають особливо важливими, коли проводиться вимірювання на великих відстанях, лазерне сканування відкритих просторів чи ведеться спостереження за об'єктами у несприятливих погодних умовах.[10]

На теренах України, з її потенційно суттєвими змінами температури та рівня вологості протягом року, інкорпорація атмосферних даних є безумовно необхідною складовою для досягнення високої точності LiDAR-моніторингу.

2. Архітектура та функціональні елементи LiDAR-системи

LiDAR, або Лазерне Випромінювання та Діапазонування, являє собою дієву оптикоелектронну апаратуру дистанційного знімання, яка застосовує лазерні імпульси для з'ясування просторового розташування предметів та створення об'ємних зразків оточення.

Головна перевага цієї технології полягає у здатності здобувати надзвичайно точні просторові дані, незалежно від того, яке природне освітлення наявне.

Стандартна ЛіДАР-установка являє собою сукупність зблокованих компонентів, завдання яких полягає у формуванні лазерного спалаху, його реєстрації, опрацюванні отриманих даних та географічній прив'язці кінцевих відомостей.

Основоположним вузлом даного комплексу слугує джерело лазерного світла, найчастіше це діодний лазер.

Характеристики випромінювання, а саме: частота (довжина хвилі), інтенсивність потужності та спосіб роботи, безпосередньо корелюють із призначенням системи.

Переважна більшість актуальних LiDAR-датчиків функціонують у ближній інфрачервоній ділянці спектру (це можуть бути довжини хвиль 905 нм чи 1550 нм).[10],[22]

У цьому контексті застосовуються два ключові методи формування випромінювального імпульсу:

Робота в імпульсному режимі

Це найчастіше застосовуваний спосіб на практиці.

Лазерна установка генерує короткі спалахи, тривають вони лише кілька наносекунд, при цьому пікова потужність є дуже високою.

Визначення відстані до цілі здійснюється завдяки фіксації часу, який потрібен імпульсу для того, щоб подорожувати туди й назад (Time of Flight – ToF).

Завдяки цьому методу досягається відмінна точність та висока результативність навіть на значних відстанях, що є критично важливим під час створення карт чи нагляду за великими площами.

Режим безперервного випромінювання (CW LiDAR)

Тут задіяно лазерне проміння, яке випромінюється безперебійно, а його параметри піддаються модуляції.

Існують такі підходи:

- АМСW – відстань обчислюється на основі зсуву фаз між сигналом, що посилається, та тим, що приймається;
- FMCW – для визначення дистанції та швидкості цілі використовується частотна модуляція та ефект Доплера.

Хоча системи FMCW здатні одночасно фіксувати швидкість об'єкта, їхнє апаратне втілення є більш заплутаним, і вони потребують більшої стабільності частоти.

Блок сканування, власне, займається створенням просторової картини поля, яке оглядається.

Саме йому належить визначення межі кутового охоплення, частоти збору даних та деталізації сформованого набору точок.

Для того, щоб змінити траєкторію лазерного променя, використовуються такі технічні засоби:

- механізми з обертовими дзеркалами;
- оптичні системи, що здійснюють коливання;
- матриці на базі твердих тіл, якими керують за допомогою електроніки.

Вибір конкретного способу відхилення визначається низкою параметрів: необхідністю у високій швидкості сканування, дистанцією, на

якій проводяться вимірювання, а також вимогами до загальної стабільності роботи системи.

Приймальний вузол системи складається з фотоприймача, завданням якого є фіксація імпульсів лазера, що відбилися.

У більшості випадків використовуються такі типи детекторів:

- фотодіоди, що працюють за принципом лавинного підсилення (APD);
- однофотонні лавинні прилади (SPAD).

Ці складові спроможні вловлювати зовсім незначні імпульси, демонструючи чутливість, що сягає одиничних фотонів.

Світловий відгук, що надходить, трансформується у електричний сплеск, який далі надсилається до вузла, відповідального за опрацювання даних.

Даний блок слугує головним «аналітичним центром» у складі LiDAR-установки.

Його відповідальність охоплює наступні завдання:

- Визначення часових проміжків (за допомогою таймерів-корисностей, TDC);
- Усунення небажаних перешкод (шумів);
- Збільшення потужності ледь помітних відбитих відбиттів;
- Коригування вбудованих систематичних неточностей;
- Розрахунок дистанції до об'єкта спостереження;
- Створення просторової моделі (тривимірної сітки точок).

Надзвичайно вагомим аспектом є опрацювання сигналів із низьким рівнем співвідношення "сигнал до шуму" (С/Ш), що типово для малогабаритних або географічно віддалених об'єктів.[9]

За відсутності належного посилення та фільтраційних заходів, подібні сигнали здатні загубитися або бути інтерпретовані як суто шумова складова.

У системах із високою продуктивністю обсяги зібраної інформації здатні сягати сотень гігабайтів, тому модуль обробки також відповідає за компресію та пересилання відомостей для оперативного подальшого розбору.

Модуль електроживлення гарантує безперебійне функціонування кожної складової апаратної частини.

У його обов'язки входить:

- подача живлення на лазерний випромінювач;
- підтримання стабільного рівня напруги приймального вузла;
- забезпечення електроживлення блоку процесора;
- контроль коефіцієнта корисної дії енергоспоживання.

Особливо гостро стоїть питання витрат енергії стосовно пересувних чи автономних апаратних засобів.

Щоб створювати геоприв'язані просторові (тривимірні) моделі, блок LiDAR тісно взаємодіє з навігаційними комплексами:

- GNSS — слугує для визначення координат у світовій системі;
- IMU — відповідає за фіксацію кутів просторового положення, показників прискорення та кутової швидкості;
- INS — об'єднує інформацію, отриману від GNSS та IMU;
- SLAM — необхідний для визначення місця розташування та побудови карти там, де немає доступу до супутникового сигналу.

Зведення до купи цих складових дає змогу досягти значної точності у визначенні місця розташування сенсора під час його руху, що є незамінним для аерофотознімання, мобільного сканування та роботи безпілотних апаратів.[10]

Блок управління здійснює координацію функціонування усіх допоміжних систем.

Він відповідає за наступні аспекти:

- узгодження часу посилу та отримання сигналу;
- налаштування робочих параметрів зондування;
- зв'язок із навігаційними блоками;
- моніторинг витрат енергії;
- відправку зібраних даних у зовнішні системи.

По суті, саме система управління є визначальним чинником продуктивності LiDAR як єдиного вимірювального апарату.

2.1 Класифікація та принципи роботи

LiDAR-датчики класифікують за низкою критеріїв, зокрема, як-от техніка сканування, експлуатаційні умови, принцип вимірювання дальності, а також галузь застосування.

Цей метод дає змогу упорядкувати весь спектр наявних розробок, ґрунтуючись на їхніх технічних особливостях та цільовому призначенні.

Відповідно до принципу формування поля зору, системи LiDAR прийнято розрізняти на два ключові класи: ті, що сканують, та ті, що не сканують (зверніть увагу на рис. 2).

Суцільнісні системи LiDAR вміщують у собі як варіанти, що не потребують сканування, так і певні реалізації немеханічних сканувальних платформ.

Серед них — пристрої, збудовані на принципах ОРА (оптичні фазовані ґратки) та Flash LiDAR, адже вони обходяться без звичних рухомих механізмів для маніпулювання лазерним променем.

Завдяки виключенню компонентів на кшталт обертових дзеркал чи актуаторів, зростає стійкість до відмов, мінімізується знос, і загалом досягається менший форм-фактор пристрою.[9],[10]

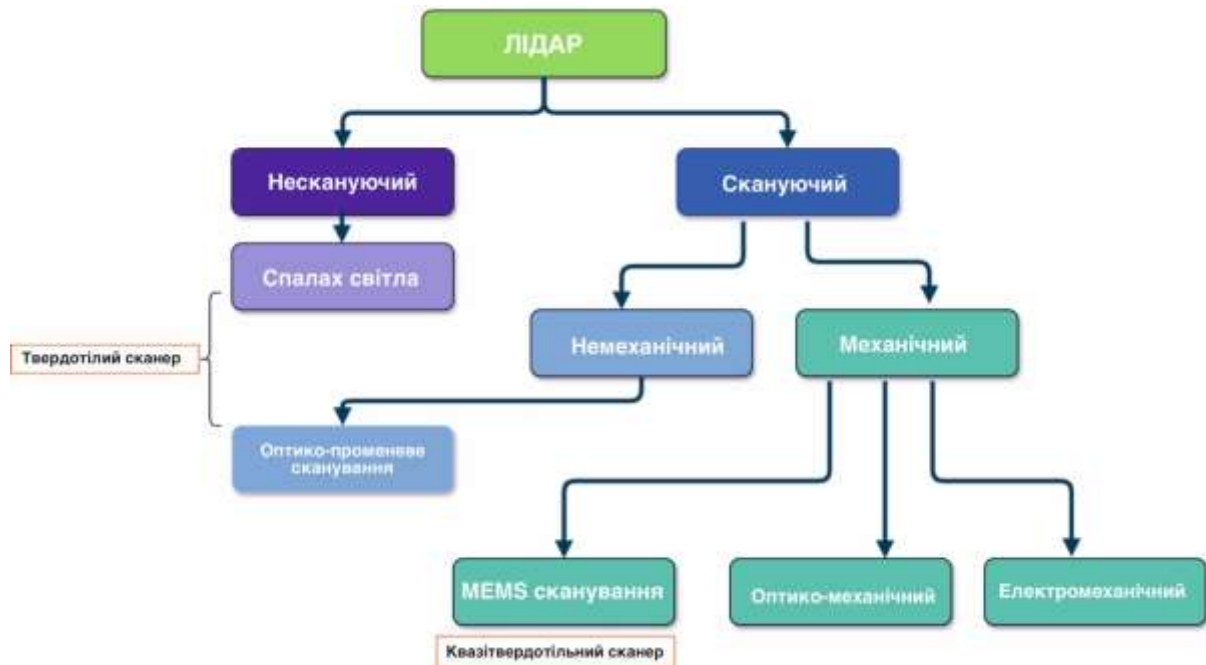


Рисунок 2. Типи датчиків LiDAR.

MEMS-сканери (що є мікроелектромеханічними системами) зазвичай класифікують як системи, близькі до твердотільного виконання.

Хоча у них немає громіздких рухомих компонентів, притаманних традиційним роторним механізмам, управління лазерним променем досягається за допомогою крихітних дзеркал, здатних змінювати його напрямки.

Така конструкція дозволяє MEMS-пристроєм досягти високої точності сканування при збереженні мініатюрних розмірів.

Якщо говорити про LiDAR у цілому, то скануючі варіанти створюють тривимірну картину простору, послідовно змінюючи кут падіння лазерного променя — або за допомогою механізмів, або шляхом електронної модуляції.

На противагу їм, нескануючі системи не переміщують промінь у межах робочої області.

Натомість вони освітлюють увесь огляд одночасно за допомогою потужного імпульсу, фіксуючи відбиту енергію за допомогою багатoelementного приймача, що функціонально нагадує роботу звичайної фотоапаратури.[20]

Лідари механічного типу залучають фізично переміщувані елементи — обертальні дзеркала, призматичні структури, сенсорні модулі чи подібні оптичні блоки — з метою покрокового дослідження простору й конструювання тривимірної проєкції.

Серед них можна виокремити кілька ключових різновидів:

- Сканери на основі MEMS-технологій

У цих установках задіяні мікроскопічні дзеркала, що забезпечують формування певної траєкторії лазерного променя.

З огляду на спосіб функціонування, їх класифікують наступним чином:

- резонансні (функціонують на сталій частоті резонансу),
- нерезонансні (контролюються зовнішніми рушіями чи електронними керуючими пристроями).

Мікроелектромеханічні системи (MEMS) здобули широке поширення завдяки своїм крихітним габаритам, низькому енергоспоживанню та здатності забезпечувати високу точність вимірювання кутів.

Їх використовують у безпілотних апаратах, робототехніці, а також у системах медичної діагностики та космічних апаратах.

Водночас, ці системи мають певні недоліки: обмежений кут огляду та робоча дальність.

Крім того, вони схильні до впливу змін температури та механічних коливань.

Оптико-механічні системи

Такі системи залучають до роботи дзеркала полігонального типу, що обертаються, котрі гарантують стабільне сканування з широким кутом охоплення.

Вони добре працюють у системах LiDAR для автотранспорту, при зборі даних дистанційного зондування та у науково-дослідній сфері, особливо там, де критично важлива висока точність на значних відстанях.

Головними вадами є суттєва вага конструкції, присутність рухомих елементів, а також неминуче поступове зношування складових частин механічного походження.

Електро-механічні системи

Ці апарати задіяні для обертання чи хитання дзеркал, застосовуючи електродвигуни (а саме крокові чи серво).

Завдяки їм стає можливим високоточне сканування значних просторів як у двох, так і у трьох вимірах.

Електромеханічні системи LiDAR були одними з перших, що вийшли на комерційний ринок, і їх активно використовують для створення карт, нагляду за об'єктами інфраструктури та вивчення атмосфери.

Водночас, їхній устрій досить об'ємний, а наявність елементів, що рухаються, зменшує їхню довговічність.

Немеханічні (твердотільні) скануючі системи

Типу, безакумуляторні лідари, які ще зветься твердотілими варіантами, не мають у собі жодних частин, що крутяться чи хитаються, якщо говорити про оптику.

Натомість, зміна напрямку лазерного променя досягається за рахунок електронних чи світлових (фотонних) технік.[7]

OPA (Optical Phased Array)

У подібних установках лазерний пучок змінює свій напрямок завдяки коригуванню фаз випромінювання у складових елементах оптичної ґратки.

Відсутність механічних рухомих вузлів гарантує значну швидкість сканування та невеликі габарити.

Поточні наукові розробки зосереджені на вбудовуванні оптичних фазових модуляторів (OPA) в інтегровані фотонні схеми (PIC).

Це веде до покращення швидкодії та зниження енергоспоживання, що робить цю технологію привабливою для великосерійного виготовлення, особливо у сфері автотранспорту.

Ключовими позитивними аспектами є оперативне електронне регулювання та висока ступінь точності.

Однак, існують труднощі, пов'язані з необхідністю керування шириною променя та мінімізацією небажаних бокових пелюсток структури ґратки.

Несканувальні (Flash) системи

Технологія Flash LiDAR промінням освітлює цілу картину одним спалахом та конструює тривимірну модель за один фіксаційний момент.

Для збору відбитого сигналу задіюється площинна решітка фотоприймачів, як правило, на основі SPAD (однофотонних лавинних транзисторів).

Позитивні риси:

- немає механічних компонентів, що рухаються;
- отримання тривимірної інформації відбувається на льоту;
- надзвичайно висока продуктивність.

Ці системи цілком підходять для завдань, що вимагають миттєвої реакції, і навіть для використання у відкритому космосі (наприклад, у комплексах для високоточного приземлення).

Проте, зазвичай їхня здатність охоплювати великі відстані та чіткість зображення програють рішенням, що використовують сканування, з огляду на це, LiDAR типу Flash найчастіше використовують на коротких проміжках.

Загальну картину розбіжностей між основними класами LiDAR-систем можна побачити у Таблиці 2.[10]

Таблиця 2. Порівняльний аналіз лідарних датчиків на основі механізму сканування

Тип LiDAR-сенсора	Опис	Поле зору (FoV)	Механізм сканування	Сфери застосування	Переваги	Обмеження
MEMS LiDAR	Використовує мікродзеркальні пластини для керування лазерним променем	Середнє залежить від кута відхилення дзеркала	Квазітвердотільне сканування (поєднання твердотільного та механічного принципів)	Автономні транспортні засоби; дрони; робототехніка; медична візуалізація; космічні дослідження; мобільні пристрої	Точне керування з мінімальною кількістю рухомих частин; компактність; висока швидкість сканування; оптимальна вартість	Обмежена дальність і поле зору; чутливість до вібрацій та факторів навколишнього середовища
Оптомеханічний LiDAR	Використовує механічні елементи.	Широке FoV (до 360°)	Обертове або коливальне дзеркало, обертова призма	Дистанційне зондування; автономні автомобілі; аерозйомка; картографування; робототехніка; безпека	Велика дальність; висока точність і роздільна здатність; широке поле зору; швидке сканування	Громіздкість; велика маса; висока вартість; значне енергоспоживання
Електромеханічний LiDAR	Застосовує електродвигуни або приводи для переміщення	Широке FoV (до 360°)	Дзеркало, призма або повна сенсорна головка з електроприводом	Автономні системи; дистанційне зондування; атмосферні дослідження; геодезія та картографування	Гнучкі режими сканування; широке поле зору; велика дальність; висока точність	Підвищене енергоспоживання; обмежена довговічність через зношування; значні габарити

Грунтуючись на просторовому розподілі зібраних даних, системи LiDAR класифікують на три головні категорії:

- LiDAR 1D — системи, що працюють в одній вимірності;
- LiDAR 2D — сканери, що охоплюють площину;
- LiDAR 3D — комплексні системи для просторового сканування об'єктів.

Незважаючи на те, що типова конструкція LiDAR містить випромінювач лазерного променя, приймач сигналу, пристрій для розгортки та модуль для опрацювання даних, найбазовіший зразок може обходитися без механізму активного сканування.

Якщо така спрощена версія використовується, вона зараховується до категорії 1D LiDAR.

Системи, обмежені одним виміром, спроможні фіксувати відстань лише вздовж однієї, заздалегідь визначеної лінії.

Промінь лазера залишається незмінним у своїй траєкторії, і збір даних відбувається винятково по цій одній лінії.

Незважаючи на їхню базову архітектуру, лідари з одним виміром (1D) можуть бути доповнені допоміжними механізмами для маневрування.

Як приклад, у сфері забезпечення безпеки транспорту застосували рішення, де датчик був встановлений на карданному підвісі, що давало можливість орієнтувати його у різних площинах.[11],[12]

Це дозволяло ідентифікувати об'єкти, які перешкоджають руху, на залізничних шляхах на значній віддалі.

Завдяки такому компонованню було досягнуто достатньої кутової точності для розпізнавання людської присутності на дистанціях, що перевищують 1,5 кілометра.

Альтернативна методика полягає у формуванні тривимірної моделі шляхом послідовного збирання одновимірних (1D) вимірів, які отримуються у процесі переміщення рухомої платформи.

Як приклад, апаратура з використанням LiDAR Lite v3 та сервомеханізмів надавала змогу розробляти просторові зображення для малогабаритних самохідних апаратів.

Огляд (сканування) охоплював кутовий діапазон близько 150 градусів у горизонтальній площині та 120 градусів – у вертикальній.

Під час первинної фіксації об'єкта датчик переходив до більш ретельного зондування з метою створення контуру перешкоди.

Прогресивний метод сканування посприяв зменшенню тривалості обробки матеріалу більш ніж удвічі, що є критично важливим для систем навігації, яким необхідна робота в умовах реального часу.

Системи LiDAR, що працюють у двох вимірах, генерують інформацію про сканування у межах однієї проєкції, як правило, горизонтальної площини.

Ці технології значно поширені у сфері мобільної робототехніки, самокерованої навігації та у вирішенні завдань одночасного позиціонування й картування (SLAM).

Що стосується застосування у контексті виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА), 2D LiDAR інтегруються з механізмами наведення (турілями) для цілеспрямованого супроводження об'єктів.

В окремих наукових працях доведено доцільність використання невеликої кількості даних (розріджених вимірів) замість насичених хмар точок, що веде до зниження загальних вимог до обчислювальної потужності.

Існують іще методи, які зводять до купи 2D ToF лідари та глибинні камери для формування зведених (гібридних) описів оточення.

Структура подібних апаратних комплексів, як правило, містить такі складові:

- блок картографування (або побудови карти),
- блок визначення об'єктів інтересу,

- блок розробки траєкторії руху.

На виході отримуємо тривимірну карту заповненості простору, котра слугує основою для самостійного (автономного) вивчення місцевості.

Перевірки, проведені як у віртуальних симуляторах, так і на робочих зразках техніки, засвідчили вищу продуктивність цих алгоритмів на тлі загальноприйнятих (класичних) підходів до пошуку простору.

Двовимірні лідари також використовуються з метою розпізнавання наземних об'єктів, що заважають руху, та вад у стані дорожнього покриття.

Розбиття хмари точок на складові, що утворюють лінії, дає змогу розрізняти між собою перешкоди, вибоїни чи сам дорожнє полотно.

Хоча існує ризик надмірного розподілу на менші частини, корегування параметрів алгоритмічного процесу дає змогу вийти на стабільні показники.

У сфері розпізнавання об'єктів, що рухаються, сенсори 2D LiDAR зводяться до роботи у зв'язці з методами порівняння послідовних проходів та системами одночасної локалізації та картування.

Завдяки такій комбінації досягається висока швидкість реакції, навіть коли оточення вирізняється значною насиченістю об'єктами або є високодинамічним.

Пристрої 3D LiDAR генерують повний обсяг тривимірних даних про простір, надаючи найбільш насичену картину навколишньої обстановки.

Стосовно ідентифікації безпілотних літальних апаратів (БПЛА), 3D LiDAR довів свою незаперечну надійність, незважаючи на коливання рівня освітлення чи зміни зовнішніх умов.

Проведені випробування засвідчили, що ефективна дистанція виявлення зумовлюється не виключно габаритами самого апарату, але й його забарвленням, а також властивостями відбиття його поверхні.

Навіть коли кількість точок на значній відстані зменшується, система все одно підтримує надійність визначення місця розташування, адже найбільш відбиваючі складові продовжують домінувати у сигналі.

З метою вирішення завдань простежування використовуються методики множинного зіставлення об'єктів, котрі інтегрують оцінку траєкторії як у короткостроковій, так і у довготривалій перспективі.

Застосування згорткових мереж на графах дає змогу якісніше пов'язувати об'єкти між послідовними зображеннями, що мінімізує хибні спрацювання ідентифікації під час часткового чи повного затемнення.

У кожного різновиду LiDAR-устаткування є свої сильні й слабкі сторони стосовно:

- максимальної дистанції, на якій можливе виявлення,
- насиченості хмари точок,
- споживаної потужності,
- габаритів та ваги,
- фінансових витрат на впровадження.

Конкретне апаратне рішення обирається з огляду на експлуатаційне середовище, необхідний рівень точності, фінансові рамки та специфіку завдання — будь то забезпечення руху безпілотного апарату чи ідентифікація та супровід безпілотних літальних апаратів.

3. Методи обробки даних LiDAR

3.1 Кластеризаційні підходи до аналізу хмар точок

Протягом останніх років методи кластеризації знайшли широке застосування у сфері опрацювання тривимірних хмар точок, отриманих за допомогою LiDAR-технологій, що значно розширило потенціал автоматизованого аналізу просторової інформації.

З огляду на їхню порівняну легкість впровадження та невисокі вимоги до обчислювальних ресурсів, подібні алгоритми перетворилися на один із найбільш затребуваних інструментів для початкового етапу ідентифікації об'єктів у масивах даних LiDAR.

Базовим серед алгоритмів виступає кластеризація на основі евклідової відстані, відома як EDC (Euclidean Distance Clustering).

Суть її полягає у згрупуванні об'єктів у скупчення, керуючись просторовою суміжністю та беручи до уваги визначений поріг дистанції.

Якщо проміжок між двома точками, що є сусідами, не перевищує заданої величини, ці точки автоматично зараховуються до спільного кластера.

Даний підхід демонструє свою ефективність переважно тоді, коли наявні чітко відокремлені об'єкти та набори точок мають однакову щільність.

Ще один часто вживаний метод — це DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise), який являє собою алгоритм групування, що базується на густині оточення.

Цей метод створює угруповання у тих місцях, де спостерігається достатня згущеність точок, при цьому він самостійно виділяє дані, що не належать до жодної групи (шум).

Сильною стороною DBSCAN є його спроможність опрацьовувати кластери нерегулярної форми, а також набори даних, у яких присутні викиди.

У наукових роботах, котрі стосуються орієнтування безпілотних авіаційних апаратів (БПЛА), кластерний аналіз застосовується задля ідентифікації перешкод у живих умовах.

Один із таких методів був апробований із використанням 2D лазерного далекоміра RPLIDAR A2, що працював у парі з одноплатовим комп'ютером Raspberry Pi та апаратною платформою DJI Matrice 100.

Ця апаратура виконує повне сканування простору навколо себе (на 360 градусів) завдяки механізму ротації самого сенсора.

Зважаючи на те, що цей вимірювальний прилад закріплений на апараті, який постійно рухається, початкові дані, отримані сенсором, неминуче будуть детерміновані поточним місцем розташування та кутовою позицією безпілота.

Отже, перед тим, як ми продовжимо будь-яку обробку, відбуваються такі кроки:

- Система координат змінюється з полярної на прямокутну (декартову);
- Виключається вплив руху на основі інформації, отриманої з інерціального вимірювального блоку (IMU);
- Позиція коригується з огляду на застосовану модель швидкості.

Ключовими характеристиками, які використовуються для групування (кластеризації), є:

- Визначення відстані між точками, що знаходяться поруч одна з одною;
- Аналіз концентрації об'єктів у певній зоні.

Щодо виокремлення об'єктів, було задіяно метод CBRDD, котрий виявився ефективнішим за DBSCAN, особливо коли стосується точок, розподілених нерівномірно.

Там, де щільність даних була однаковою, обидва методи демонстрували співмірну якість.

Окремий напрям роботи полягає у злитті інформації, отриманої від декількох сенсорів LiDAR (наприклад, це може бути поєднання Livox Avia та LiDAR 360).

У подібній установці:

- перший датчик надає огляд усього простору;
- другий виконує точні заміри у визначені інтервали.

Перед тим, як дані почнуть аналізуватися, їхні часові відмітки вирівнюються, а потім вони зливаються.

Для ідентифікації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) застосовується метод кластеризації CL-Det, що базується на алгоритмі DBSCAN.

Припускається, що той кластер, який є найбільшим і не збігається з оточенням, асоціюється саме з дроном.

Місцезнаходження безпілотного літального апарату (БПЛА) визначається шляхом усереднення координат точок, належних до відповідного скупчення, у прямокутній системі координат (що охоплює осі x , y , z).

Для усунення недоліку, спричиненого недостатньою щільністю вимірів, залучаються раніше отримані дані про розташування, що гарантує збереження цілісності траєкторії навіть у випадках тимчасової відсутності сигналів.

Ця методика демонструє значну стійкість у процесі супроводу цілі, особливо коли дані представлені неповними або уривчастими масивами точок.

Незважаючи на те, що методи кластеризації досить дієві, вони все ж мають певні вади:

- вимагають, аби оператор самостійно встановлював такі параметри, як граничні значення відстаней, мінімально необхідний ступінь густоти даних та подібне;
- їхня робота надто залежна від коливань умов оточення;
- існує ризик отримати або занадто дрібну, або навпаки, занадто грубу сегментацію, особливо коли сцена є заплутаною;
- фундаментом для їхньої роботи слугують ознаки, обрані людиною.

Порівняно з тими методами, що базуються на глибинному навчанні (deep learning), ці алгоритми виявляють меншу гнучкість у пристосуванні до умов, котрі є заплутаними чи постійно змінюються.

Надійним шляхом розвитку видаються комбіновані (гібридні) системи, де кластеризація інтегрується із застосуванням машинного або глибокого навчання.

У подібній будові кластеризація може слугувати етапом первинного розділення (сегментації), а далі нейронні мережі відповідатимуть за власне класифікацію та тонке виділення контурів об'єктів.

Глибинне навчання вже засвідчило свою потужність у сферах опрацювання візуальної інформації, аудіоданих та текстових масивів, і його інтеграція з даними LiDAR відкриває перед нами свіжі перспективи для покращення точності у виявленні та прослідковуванні безпілотних літальних апаратів.

3.2 Підходи глибокого навчання для обробки LiDAR-даних в умовах України

З огляду на триваючу повномасштабну війну та неминучу небезпеку використання безпілотників, пошук ультраточних і повністю автономних способів ідентифікації об'єктів у небі стає надзвичайно важливим.

Саме це спонукає українських науковців усе частіше спрямовувати свої зусилля на застосування методів глибокого навчання (DL) для обробки тривимірних масивів даних (хмар точок), отриманих за допомогою LiDAR.

На противагу традиційним підходам до групування даних, які зазвичай вимагають ручного добору параметрів і є вразливими до змінних умов, архітектури нейронних мереж демонструють здатність самостійно виокремлювати комплексні просторові характеристики та пристосовуватися до різноманітних сценаріїв застосування — чи то щільна міська забудова, промислові ландшафти, відкриті простори, чи зони, де розташовані об'єкти критичної ваги.

Напрямок застосування архітектур різновиду PointPillars є надзвичайно багатообіцяючим для ідентифікації малогабаритних цілей у повітрі, зокрема, атакувальних дронів та скупчень (ройових утворень) безпілотних літальних апаратів.

Щоб припасувати цю модель до умов повітряного оточення над населеними пунктами на території України, варто осучаснити підхід, розділивши простір сканування LiDAR на горизонтальні площини, кожна з яких матиме власний набір базових елементів (опорних прямокутників), що спроможе збільшити точність визначення місцязнаходження об'єктів на різних висотахних рівнях.

Беручи до уваги дефіцит доступу до значної кількості фактичних бойових даних, раціональним кроком видається залучення цифрових копій (двійників) та відтворення змодельованих сценаріїв.

У віртуальному просторі здатні моделюватися типові обставини:

- підліт дронів до елементів інфраструктури енергетики;
- переміщення на невеликих висотах серед міських будівель;
- колективне маневрування безпілотними літальними апаратами.

Створені штучно 3D-дані, отримані шляхом моделювання цих сценаріїв, можуть бути інтегровані з фактичними LiDAR-вимірами з метою посилення надійності моделей у протистоянні різноманітним атмосферним явищам (мряка, злива, заметілі), що є властивим кліматичному регіону України.

Надбані в рамках міжнародних наукових пошуків дані свідчать про те, що доопрацьовані моделі глибокого навчання (DL) можуть демонструвати вражаючі показники повноти та точності виявлення (на рівні 80–95% і більше), що є вирішальним аспектом для функціонування систем, призначених для швидкого оповіщення.

Водночас важливий вектор роботи пов'язаний із застосуванням двовимірних лазерних далекомірів (LiDAR) у тандемі з глибокими рекурентними архітектурами для проведення аналізу динаміки переміщення об'єктів.

Незважаючи на те, що спершу ці методи використовувалися для ідентифікації дій людей, їхня базова ідея цілком підходить для таких завдань, як:

- знаходження безпілотників усередині складів чи ангарних споруд;
- забезпечення безпеки важливих об'єктів від маловисотних непілотованих апаратів;
- моніторинг внутрішньої зони довкола військових або стратегічно значущих об'єктів.

Коли 2D-лідари встановлюються на рухомих носіях, вони здатні безперервно обстежувати простір, а далі отримані часові ряди аналізуються

за допомогою архітектур LSTM, що, своєю чергою, дає змогу брати до уваги, як саме рухаються об'єкти.

Для нашої держави надзвичайно суттєвим є синергетичний ефект від застосування методів глибокого навчання (DL) у тандемі з комплексом багатосенсорних пристроїв (куди входять LiDAR, радар, радіочастотні датчики та оптичні сенсори).

Саме глибинне навчання може бути ефективно задіяне для таких завдань як:

- Зведення до купи даних, отриманих із різних за типом джерел;
- Мінімізація частоти хибнопозитивних детектувань;
- Чітке розрізнення між безпілотними апаратами, з одного боку, та птахами або фрагментами уламків, з іншого;
- Можливість супроводу та моніторингу скупчень БПЛА у режимі, наближеному до оперативного.

У майбутньому, безумовно, варто розглянути розробку та впровадження пересувних установок на базі LiDAR задля забезпечення надійного захисту критичних об'єктів енергетичної галузі, важливих логістичних вузлів, мостових споруд та військових об'єктів.

Перспективи подальших розробок варто зосередити на таких аспектах:

- Збільшення дистанції, на якій можливе виявлення об'єктів, без при цьому зростання витрат енергії;
- Вдосконалення алгоритмічних рішень з метою їх ефективного функціонування на малопотужних, вбудованих апаратних засобах;
- Припасування обчислювальних схем до роботи в екстремальних метеоумовах та в ситуаціях інтенсивного радіоелектронного протистояння.

Отже, застосування підходів глибокого машинного навчання до обробки отриманих з LiDAR даних на території України являє собою не

лише актуальний науковий вектор, а й цілком прикладний засіб для посилення рівня захищеності повітряної сфери та охорони життєво важливих об'єктів інфраструктури.

3.3 Реальне застосування LiDAR у поєднанні з глибоким навчанням

Злиття технології LiDAR із застосуванням методів глибокого навчання виявилось ключовим кроком у прогресі новітніх систем, призначених для виявлення та супроводу безпілотних літальних апаратів.

Одночасне використання прецизійних даних про просторове розташування та здатності штучних нейронних мереж до автоматизованого виокремлення характеристик суттєво покращило результативність спостереження за повітряним простором, що має першочергове значення у сферах забезпечення безпеки та охорони об'єктів стратегічного значення.

Нейронні мережі глибокого навчання (DL) останнім часом доводять свою видатну ефективність у задачах виявлення безпілотників, навіть коли наявні перешкоди, такі як шум, розріджені скупчення точок або заплутане тло.

Наприклад, архітектура PointPillars довела свою спроможність у процесі очищення LiDAR-даних від стороннього шуму, що генерується роєм, досягаючи високого ступеня очищення хмари точок, при цьому зберігаючи всі важливі відомості про об'єкти інтересу.

Це рішення відкриває значні можливості для аналізу скупчень БПЛА, особливо коли завдання полягає у відділенні індивідуальних цілей від взаємного впливу (завад) у зібраних даних.

Для завдань моніторингу поза межами видимості оператора застосовувалися з'єднання глибоких навчальних моделей та адаптивного фільтру Калмана.

Такий підхід уможлиблював одночасне здійснення оперативного виявлення цілі і розрахунку її шляху руху у тривимірному контурі.

У більш заплутаних сценаріях використовувалися системи з кількома типами датчиків, де лазерний далекомір (LiDAR) поєднувався з ширококутними камерами (типу «око риби») та міліметровими радіолокаційними установками.

Завдяки впровадженню найновіших структур, якість утримання 3D-позиції об'єктів у вільному повітряному просторі значно зросла.

Коли сигнали супутникової навігації недоступні (як-от у будівлях чи під час радіопридушення), рекурентні архітектури на кшталт ConvLSTM, які здатні опрацьовувати упорядковані дані з LiDAR, довели свою ефективність.

У проведених дослідженнях відсоток правильного виявлення руху часто сягав 99% і більше.

Окрім того, було продемонстровано, що застосування лідарів, у синергії з аналізом візуальних даних, забезпечує надзвичайно точне супроводження безпілотних апаратів навіть у тих ситуаціях, де освітлення є несприятливим.

Окрім того, що застосовується для боротьби з безпілотниками, LiDAR у поєднанні з фреймворками глибокого навчання (DL) знаходить успішне використання і в інших галузях.

Приміром, у сфері геологічної інженерії згорткові мережі нейронів, побудовані на архітектурі GoogleLeNet, були задіяні з метою дослідження об'ємних хмар точок, сформованих гірськими породами.

Спираючись на координати кожної точки та вектори їхніх нормалей, ця модель спромогла себе у виявленні природних розломів, а подальше використання таких методів, як DBSCAN та PCA, дало змогу встановити просторове спрямування цих розломів.

Важливо, що подібні підходи цілком можливо пристосувати для контролю за станом як будівельних об'єктів, так і захисних споруд.

У царині дистанційних досліджень простору, невеликі за розміром нейронні архітектури, зокрема багаторівневі мережі на графах та ConvPoint, виявилися вельми дієвими при ідентифікації тривимірних об'єктів у мультисенсорних даних з LiDAR-систем.

Тим часом, у секторі самокерованого транспорту, графові нейронні мережі, оснащені способами узгодження характеристик для точок, розташованих поруч, продемонстрували надійну продуктивність у випробуваннях на наборі даних, незалежно від рівня труднощів довкілля (від простих до найбільш заплутаних ситуацій).

Обробка представлених наукових праць доводить: застосування моделей глибокого навчання значно покращує показники точності, стійкості та здатності до пристосування у системах, що використовують LiDAR для виявлення об'єктів.

Це відкриває ширші горизонти використання — від ідентифікації скупчень безпілотних літальних апаратів і забезпечення протиповітряної оборони до функціонування безпілотних транспортних засобів, вивчення підземних геологічних утворень та оцінки манер руху об'єктів у вибагливих умовах.

Для українського контексту користь цих технологічних розробок полягає у формуванні великомасштабних, комплексних сенсорних платформ завчасного попередження.

Такі системи повинні забезпечувати функціонування в режимі реального часу, здатність до об'єднання інформації з різноманітних сенсорів та підтримання високої працездатності навіть при наявності перешкод, часткової втрати сигналу або мінливому оточенні.

Таблиця 3. Реальні застосування LiDAR з використанням глибокого навчання

Підхід / Архітектура	Тип даних LiDAR	Основне призначення	Переваги	Обмеження	Потенціал для України
PointPillars (модифікована)	3D хмари точок	Виявлення та локалізація БПЛА, у т.ч. роїв	Висока швидкість; добра точність; ефективна обробка розріджених даних	Потребує значних навчальних даних; складність оптимізації	Системи раннього попередження; захист критичної інфраструктури
YOLO + фільтр Калмана	LiDAR + зображення	3D-відстеження БПЛА (BVLOS)	Реальний час; стабільне прогнозування траєкторії	Чутливість до помилок детекції; потребує сенсорної інтеграції	Моніторинг повітряного простору міст та об'єктів енергетики
YOLOv9 + LiDAR + радар мм-діапазону	Мультисенсорні дані	Стійке 3D-відстеження у складних умовах	Підвищена надійність; зменшення хибних спрацювань	Висока складність інтеграції; вартість обладнання	Комплексні оборонні системи протидії БПЛА
ConvLSTM (2D LiDAR)	Послідовності 2D-сканів	Розпізнавання руху та динаміки об'єктів	Висока точність у приміщеннях; аналіз часової динаміки	Обмежена просторова інформація; залежність від траєкторії руху	Захист закритих об'єктів, складів, ангарів
GNN / HGNet / ConvPoint	3D хмари точок	Виявлення 3D-об'єктів у складних середовищах	Глибокий аналіз просторових зв'язків; адаптивність	Високі обчислювальні витрати	Мобільні системи моніторингу; інтеграція в автономні платформи
GoogleLeNet CNN + DBSCAN + PCA	3D LiDAR (геопросторові дані)	Класифікація структур і орієнтації об'єктів	Висока точність класифікації; простота ознак	Обмежена універсальність поза специфічними задачами	Моніторинг інфраструктури та укріплення

3.4 Об'єднання датчиків для підвищення ефективності виявлення БПЛА

Вади, властиві окремим датчикам, переконливо доводять перевагу застосування комплексних сенсорних установок над тими, що базуються на одному типі сенсора.

Злиття даних із більше ніж одного джерела дає змогу нівелювати недоліки кожної окремої технології й водночас посилити загальну стійкість роботи системи, призначеної для ідентифікації безпілотних літальних апаратів.

Найбільш типовою стратегією є комбінування Лідару з оптичними камерами.

Лідар демонструє здатність з високою точністю формувати тривимірну модель просторового розташування об'єктів, у той час як камери забезпечують насичену інформацію щодо текстури та спектральних ознак оточення.

Ось така сукупність дає змогу:

- нівелювати падіння продуктивності камер за умов недостатньої освітленості;
- мінімізувати вплив метеорологічних умов на роботу LiDAR;
- досягти вищої точності у визначенні габаритів, конфігурації та категорії об'єкта.

Перш ніж об'єднувати інформацію, необхідно провести калібрування сенсорів, що гарантує відповідність їхніх систем координат.

Після спільного калібрування утворюється набір точок, які є розрідженими й окремими, і які потребують подальшого розбиття на групи.

Застосування методів сегментації дає змогу згрупувати точки, що стосуються однієї перешкоди, й визначити її просторові параметри.

У ході польових випробувань безпілотних літальних апаратів (БПЛА), обладнаних лідарами та камерами, були перевірені такі ситуації:

- оминання дротів ліній електропередач;
- прокладання маршруту навколо споруд у міському середовищі;
- ідентифікація малогабаритних апаратів, що літають низько.

Ефективність роботи оцінювалася застосовуючи показники надмірної сегментації та коефіцієнта перетину над об'єднанням.

Отримані дані демонструють, що алгоритм, який використовує дані з кількох сенсорів, випереджає рішення, засноване лише на лідарі, щодо точності визначення дистанцій, габаритів і поточного стану рухомих об'єктів.

Альтернативна методика полягає у застосуванні пересувних установок, які інтегрують у собі:

- Лазерні сканери з оглядом на 360 градусів,
- Ротаційні й нахиліві камери у видимому діапазоні,
- Інфрачервоні термографічні системи.

Робота подібних комплексів зазвичай складається з двох послідовних кроків:

1. Спочатку відбувається знаходження цілі, для чого залучається 3D LiDAR, який також визначає її позицію у просторі.

2. Далі, камери автоматично спрямовуються на визначену зону, щоб уточнити ідентифікацію об'єкта, використовуючи комп'ютерний зір на базі CNN.

Нейронна мережа, аналізуючи отримані візуальні дані, проводить розрізнення: чи це безпілотник конкретного класу, чи пернатий.

Такий подвійний метод істотно мінімізує помилкові тривоги.

Актуальні заступи проти безпілотників оперують багатовимірними, так би мовити, мультимодальними підходами, які охоплюють таке:

- Послідовність визначення категорії апарату (насамперед, спираючись на візуальні дані);
- Послідовність тривимірного простежування та визначення координат (з використанням даних від LiDAR та радіолокаційних станцій).

Для удосконалення міри точності застосовуються такі методи:

- Добірка найбільш інформативних зображень (наприклад, за допомогою YOLOv9);
- Зведення низки спостережень у групи на підставі схожості їхніх характеристик;
- Методи «нежорсткого» консенсусу для спільного використання отриманих висновків;
- Процедури багаторазового супроводу цілей (MOT) з метою виправлення перешкод та відновлення втрачених маршрутів.

Впровадження радарів у міліметровому діапазоні гарантує виявлення об'єктів із великої відстані, тоді як LiDAR створює детальну тривимірну модель оточення, а оптичні (видимі та інфрачервоні) камери використовуються для більш точної ідентифікації природи цілі.

Окрім технологічних рішень, згаданих раніше, у мультисенсорних комплексах зазвичай також застосовують:

- Інфрачервоні сенсори — їхня роль полягає у реєстрації теплових ознак об'єктів у темний час доби;
- Звукові приймачі — слугують для розпізнавання унікальних звукових профілів, які створюють пропелери;
- РЧ-приймачі — використовуються для фіксації радіочастотних ліній комунікації апарату із пультом керування.

Кожен тип сенсора вносить у загальну картину свій унікальний аспект даних:

- LiDAR — забезпечує відомості про просторовий розподіл та відстань до об'єктів;
- Відеокамера — надає інформацію про вигляд поверхні та обриси об'єктів;
- Тепловізори — фіксують температурні характеристики;
- Акустичні засоби — збирають дані про шумову складову;
- Радарні системи — визначають дистанцію та швидкість переміщення.

Незважаючи на усі плюси мультисенсорних комплексів, їх впровадження обтяжене низкою серйозних інженерних викликів:

- Проблема синхронізації даних у просторі та часі вимагає складних рішень;
- Життєво необхідним є високоточне юстування апаратури;
- Потрібне апаратне забезпечення з великим запасом потужності;
- Обробка масивних дата-стрімів "на льоту" часто супроводжується помітними затримками.

Для нашої держави ці моменти набувають ключового значення, бо апаратура повинна функціонувати надійно при наявності:

- Інтенсивних радіоперешкод,
- Заплутаної міської архітектури,
- Різноманітності кліматичних обставин,
- Дефіциту енергетичних джерел.

Отже, злиття даних від LiDAR з іншими сенсорними платформами, підкріплене застосуванням методів глибокого навчання, складає ядро нинішніх рішень для протидії безпілотним літальним апаратам.

Саме ця інтеграція різнорідних сенсорів гарантує найвищий ступінь точності при знаходженні, ідентифікації й супроводі повітряних об'єктів, особливо за умов, що склалися у реальному середовищі.

3.4.1 Інтеграція LiDAR для надійного виявлення БПЛА в умовах відсутності GNSS

У тих умовах, коли приймання сигналу GNSS неможливе, погіршене або цілеспрямовано блокується (типова ситуація при активних заходах радіоелектронної протидії), технологія LiDAR стає одним із найважливіших засобів для гарантування надійної орієнтації й ідентифікації тих об'єктів, що знаходяться у повітряній сфері.

На противагу системам супутникового визначення місця розташування, LiDAR функціонує без прив'язки до будь-яких зовнішніх інсталяцій і дає змогу створювати дуже деталізовану тривимірну карту оточення безпосередньо в процесі роботи.

Завдяки тому, що LiDAR у змозі створювати докладні тривимірні хмари точок, він гарантує впевнене знаходження, визначення позиції та стеження за безпілотними літальними апаратами (БПЛА) навіть у важких умовах — чи то міська забудова, густі ліси, промислові об'єкти, чи внутрішні приміщення.

З огляду на це, наукові розробки у цій сфері зосереджені на конструюванні надійних методів обробки даних та комплексних (мультисенсорних) систем, здатних функціонувати без доступу до глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS).

Ключовим методом виступає комбінування технології LiDAR разом із системами комп'ютерного зору.

У реалізаціях, розроблених для виконання польотів у далекому видимому полі, використовувалася архітектура з метою ідентифікації повітряних цілей на знімках, тоді як для опрацювання інформації, отриманої від LiDAR у вигляді хмар точок, залучалися методи кластеризації.

Зведена інформація досягалася застосуванням фільтра Калмана, який зливав воедино як двовимірні (отримані з візуального каналу), так і тривимірні (від LiDAR) прогнози, базуючись на моделях із незмінним прискоренням.

Визначення просторового розташування об'єкта здійснювалося через синергію даних про відстань із LiDAR та координатних значень центру цілі, зафіксованого на зображенні.

Симуляції, проведені у середовищі Gazebo, продемонстрували, що застосування такої комбінованої мультисенсорної архітектури:

- сприяє прискоренню процесів виявлення;
- мінімізує частоту невірних спрацювань;
- забезпечує вищу стійкість траєкторного супроводу у зіставленні з системами, що ґрунтуються на одному типі сенсорів.

У рамках іншої методології, LiDAR виступає у ролі основного сенсорного приладу, повністю замінюючи функції GNSS у завданнях, пов'язаних із навігацією.

На основі даних, отриманих із сенсора, було успішно втілено алгоритм для моніторингу положення безпілотної всередині приміщень на дальності від 0,5 до 8 метрів.

Процедура складалася із двох фаз:

- Започаткування позиції безпілотної.
- Синтез візуальних даних із деталізованим тривимірним нагромадженням точок.

Для визначення достовірності застосовувалися такі показники:

- похибка абсолютної позиції (APE),
- неточність швидкості,
- використовуючи еталонні показники системи відстеження рухів.

Зіставлення з методами, що ґрунтуються виключно на візуальних даних або лише на хмарах точок, засвідчило переваги нашого комплексного підходу.

Плани на майбутнє включають злиття інформації з RGB-камер та LiDAR-сенсорів задля покращення точності у викликових сценаріях.

Напрямок, що також має значний потенціал, полягає у застосуванні ансамблю LiDAR-датчиків, які відрізняються своїми показниками кутів огляду та специфікою скануючих патернів.

У наявності були такі комплекти сенсорів:

- здатний до обертання лазерний далекомір тривимірний (LiDAR),
- пара твердотільних LiDAR-пристроїв,
- камера, що фіксує колір та глибину (RGB-D).

Процедура калібрування полягала у визначенні просторового розташування сенсорів і трансформації усіх зібраних точкових хмар у спільний референц-простір.

Для формування еталонної бази даних була задіяна система оптичного захоплення руху.

Якість роботи оцінювалася за показником середньоквадратичної похибки (RMSE), що продемонструвало покращення точності визначення положення відносно рішень, заснованих лише на одному LiDAR-пристрої.

Мультилідарні побудови вирізняються високою результативністю у таких умовах:

- приміщеннях із чіткою структурою,
- зовнішніх зонах зі складною, неструктурованою конфігурацією,
- виконанні завдань паралельного супроводу чисельних безпілотних апаратів (БПЛА).

Значний поступ у сфері навігації, незалежної від GNSS, був досягнутий завдяки інтеграції систем LiDAR-візуально-інерціальної одометрії (LVIO).

У архітектурі зведено до купи такі компоненти:

- лазерний далекомір (LiDAR),
- візуальний сенсор (камера),
- блок вимірювання інерційних параметрів (IMU).

За основу береться система координат, що формується IMU, тоді як ЛІДАР і камера виконують підтримуючу функцію.

Для досягнення високої точності узгодження використовуються такі методи:

- Реєстрація хмар точок, виконана за гібридною схемою;
- Перехресна валідація глибинних показників візуальних характеристик;
- Ймовірнісне апроксимування неоднорідних поверхонь із врахуванням невизначеності Гаусового розподілу.

Функція оптимізації поточної позиції дає змогу зводити до мінімуму похибки визначення місця розташування, навіть якщо оточення є заплутаним та зазнає частих змін.

Цей комплекс здатний функціонувати у режимі, що не потребує затримок, та гарантує спроможність до самовідновлення у разі виходу з ладу одного з датчиків, що має вирішальне значення для застосування у ситуаціях із радіоперешкодами чи неповною доступністю інформації.

Впровадження апаратури LiDAR у просторах, де доступ до супутникових систем визначення координат (GNSS) обмежений чи неможливий, являє собою ключовий вектор еволюції апаратних комплексів для виявлення об'єктів та орієнтування безпілотних літальних апаратів.

На підставі наявних досліджень можна зробити такі висновки:

- Використання архітектур, що залучають декілька сенсорних модальностей, веде до покращення як точності, так і надійності визначення положення;
- Інтеграція даних, отриманих з давачів LiDAR, відеокамер та інерціальних вимірювальних блоків (IMU), дає змогу ефективно протидіяти втраті доступу до сигналу від навігаційних супутників;
- Рішення, що передбачають застосування кількох лідарів одночасно, сприяють досягненню більш повної просторової (геометричної) репрезентації навколишнього середовища.

Водночас, низка аспектів досі потребує вдосконалення:

- як найкраще розподілити наявні обчислювальні потужності;
- зниження часу відгуку у динамічних умовах роботи;
- забезпечення належної працездатності архітектури на портативних пристроях.

Для нашої держави подібні розробки є критично важливими, адже вони уможливлюють формування надійних комплексів для ідентифікації та супроводу безпілотних апаратів, навіть за умов інтенсивного радіоелектронного заглушення й нестабільного сигналу супутникової навігації.

3.4.2 Проблеми виявлення БПЛА на основі мультисенсорної інтеграції

Поєднання сенсорів, де LiDAR інтегрується з додатковими реєстрами інформації, наприклад, камерами кольорового зображення (RGB), радарними приладами та інерційними навігаційними блоками (IMU), надає значний потенціал для удосконалення коректності й надійності засобів виявлення безпілотних літальних апаратів.

Зведення до купи вимірювань, заснованих на різних фізичних засадах, дає змогу нейтралізувати недоліки окремих сенсорних одиниць, підвищити точність визначення місця розташування об'єктів та мінімізувати хибні ідентифікації.

Однак, впровадження подібних архітектур у фактичні робочі сценарії неминуче пов'язане з низкою інженерних та програмних викликів.

Серед нагальних викликів варто виділити наступні:

- труднощі із суміщенням у просторі та часі відомостей, отриманих із різних джерел;
- необхідність у вкрай точній апаратурній настройці (калібруванні) усіх чутливих елементів;
- нерівномірність інтервалів між оновленнями даних та розбіжності у деталізації вимірювань;
- труднощі з оперативною переробкою гігантських масивів інформації без зволікань;
- вплив атмосферних явищ, фонових перешкод та радіочастотного випромінювання;
- значні витрати енергії та великі потреби у ресурсах обчислювальної техніки.

Ці проблеми стають надзвичайно важливими у непростих умовах — зокрема, при густій міській забудові, за наявності великої кількості об'єктів, що рухаються, або ж у ситуаціях радіоелектронної протидії, коли певні дані, отримані від сенсорів, можуть бути викривлені чи цілком відсутні.

Основні труднощі, що стосуються мультисенсорного виявлення безпілотних літальних апаратів, узагальнено та представлено у Таблиці 5.

Таблиця 5 Проблеми мультисенсорного виявлення БПЛА

№	Проблема	Суть проблеми	Наслідки для системи	Можливі шляхи вирішення
1	Калібрування сенсорів	Неточне визначення зовнішніх параметрів між LiDAR, камерою, радаром та IMU.	Зміщення координат, помилки локалізації, неправильне об'єднання даних.	Регулярне автоматизоване калібрування; використання калібрувальних мішеней; онлайн-оптимізація параметрів.
2	Часова синхронізація	Різна частота оновлення даних сенсорів та затримки передачі.	Несумісність вимірювань у часі; помилки відстеження швидких об'єктів.	Використання апаратної синхронізації (PTP); часові мітки з високою точністю; фільтрація Калмана.
3	Різна роздільна здатність даних	Невідповідність щільності хмар точок і деталізації зображень.	Втрати інформації при проєктуванні 3D в 2D та навпаки.	Багаторівневе злиття ознак; використання нейронних мереж для вирівнювання представлень.
4	Вплив погодних умов	Туман, дощ, сніг знижують ефективність LiDAR і камер.	Зменшення дальності виявлення; збільшення шуму.	Інтеграція радара мм-діапазону; адаптивна фільтрація; підвищення енергетики сигналу.
5	Перешкоди та завади (РЕБ)	Глушіння GNSS, електромагнітні перешкоди для радарів і зв'язку.	Втрата позиціонування; нестабільна робота системи.	Перехід на LiDAR-візуально-інерціальну одометрію; автономні алгоритми SLAM.
6	Високе обчислювальне навантаження	Обробка великих потоків даних у реальному часі.	Затримки виявлення; підвищене енергоспоживання.	Оптимізація моделей DL; використання edge-AI; апаратне прискорення (GPU/FPGA).
7	Хибні спрацювання	Птахи, уламки, сторонні об'єкти сприймаються як БПЛА.	Зниження довіри до системи; перевантаження операторів.	Мультимодальна класифікація; ансамблеві DL-моделі; використання

				теплових та акустичних ознак.
8	Розрідженість даних LiDAR	Мала кількість точок на великій відстані або для малих БПЛА.	Нестабільність кластеризації та відстеження.	Історичне накопичення траєкторій; використання глибоких 3D-мереж (PointPillars, GNN).
9	Масогабаритні обмеження	Велика кількість сенсорів збільшує вагу та енергоспоживання платформи.	Зменшення часу автономної роботи.	Використання твердотільних LiDAR; оптимізація енергоспоживання; модульна архітектура.
10	Складність інтеграції	Неоднорідні протоколи обміну даними та програмні середовища.	Проблеми сумісності та масштабування.	Стандартизація інтерфейсів; ROS2; уніфіковані API для сенсорів.

Висновок

Стосовно поточної ситуації в Україні, особливо з огляду на воєнний стан та зростаючу небезпеку використання різноманітних безпілотних повітряних апаратів, технологія LiDAR стає надзвичайно важливою.

Вона виступає як ефективний засіб для геопросторового спостереження та ідентифікації об'єктів у повітрі.

На противагу класичним методам, які потребують наявності сигналу GNSS чи стабільного радіозв'язку, LiDAR дає змогу самостійно збирати деталізовані тривимірні дані з високою точністю.

Це можливо навіть у вкрай несприятливих умовах: серед густої міської забудови, на промислових об'єктах, у лісових масивах або там, де навмисно пригнічується радіосигнал.

У цьому дослідженні здійснено розгляд актуальних методів еволюції LiDAR-технологій — від традиційних механічних до сучасних напівпровідникових (твердотільних) конструкцій — і те, як їх поєднують із методами глибокого навчання для вдосконалення процесів виявлення та супроводу безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Продемонстровано, що використання мереж нейронного типу, а саме архітектур, призначених для роботи з просторовими даними (хмарами точок), графових структур, а також комбінованих (гібридних) стратегій, сприяє збільшенню коректності розпізнавання об'єктів у небі, мінімізації помилкових детектувань та гарантуванню надійності функціонування цих систем у мінливих обставинах.

Важливість розвитку мультисенсорних установок окремо виділяється для України.

Йдеться про системи, які ефективно об'єднують у собі LiDAR-технології з візуальними (камерами звичайного спектру), тепловізійними апаратами, радарними відчувачами та інерційними модулями.

Завдяки такому комплексному підходу вдається нівелювати недоліки, притаманні кожному сенсору окремо, що суттєво збільшує вірогідність виявлення невеликих або низьколітаючих безпілотних апаратів.

Саме такі дрони несуть безпосередню небезпеку для стратегічно важливих об'єктів, енергетичних комплексів та житлових районів.

Водночас, запуск цих систем тягне за собою низку інженерних труднощів: потребу у надточній юстировці датчиків, зведенні до спільного знаменника часових відміток, приведенні систем орієнтування (включно з прив'язкою до державних геодезичних мереж), а також доопрацюванні програмного забезпечення, аби воно функціонувало миттєво при обмеженості потужностей обчислювальних пристроїв.

Щоб ці розробки стали реально корисними в межах України, необхідно скерувати зусилля на пристосування їх до кліматичних реалій країни, особливостей забудованого простору та конкретного спектру загроз.

Наступні кроки досліджень варто зосередити на формуванні національних збірок даних із множинними сенсорами для тренування штучно-інтелектуальних моделей, вибудові енергоощадних алгоритмів для роботи у режимі реального часу та вбудовуванні систем LiDAR у розширені системи повітряного нагляду.

Отже, злиття технологій LiDAR із передовими підходами штучного інтелекту закладає науково-технічний фундамент для розробки в межах України надійних, самокерованих та надточним систем моніторингу повітряного простору, що становить ключовий складник у процесі гарантування національної безпеки та охорони життєво важливих об'єктів інфраструктури.

Список використаної літератури

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.
2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.
3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).
4. Ковальчук О. О., Креденцер Б. П., Беляков Р. О. Математична модель інформаційно-керуючої системи виявлення безпілотних літальних апаратів та баражуючих боєприпасів. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2025.
5. Лега О., Мартовицький В., Северин І. Аналіз методів виявлення безпілотних літальних апаратів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2025.
6. Танчук В., Колобродов В. Аналіз існуючих моделей виявлення БПЛА на тепловізійних зображеннях. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Приладобудування*. 2024.
7. Ткач В., Хобзей М. Виявлення дронів шляхом детектування ефекту мікро-Доплера. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024.

8. Бугайов М. В. Алгоритм виявлення акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2015.
9. Білик О., Мартинчук О., Жуга Ю. Дослідження застосування SDR HackRF для виявлення радіочастотної активності БПЛА. *ICTEE*. 2025.
10. Seidaliyeva U., Iipbayeva L., Utebayeva D., Smailov N. LiDAR technology for UAV detection: from fundamentals and operational principles to advanced detection and classification techniques. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 9.
11. Olawoye U., Gross J. N. UAV position estimation using a LiDAR-based 3D object detection method. *arXiv preprint*. 2025.
12. Хосраві Н., Вентура Р., Басірі М. Неконтрольоване виявлення та відстеження кількох БПЛА на основі LiDAR в умовах екстремальної розрідженості. Препринт arXiv. 2026.
13. Хаусберг Дж. та ін. Відносна локалізація дрон-наземний транспортний засіб за допомогою LiDAR та камер. Препринт arXiv. 2020.
14. Рен Й. та ін. Огляд автономних літальних апаратів на основі LiDAR. Препринт arXiv. 2025.
15. Абденнеджі М., Делледжі Т., Слімені Ф. Огляд виявлення БПЛА: від одного БПЛА до рою. Індонезійський журнал комп'ютерних наук. 2026.
16. Ян Х. та ін. Виявлення та відстеження БПЛА в міському середовищі за допомогою пасивних датчиків: огляд. *Прикладні науки*. 2023. Том 13, № 20.
17. Ванг Б. та ін. Огляд методів боротьби з БПЛА на основі зору. *Дрони*. 2024. Том... 8, № 9.
18. Чжен Л., Чжан П., Тан Дж., Лі Ф. Метод виявлення перешкод БПЛА на основі 2D LiDAR. *IEEE Access*. 2019.

- 19.Ріабуха В. Радіолокаційне спостереження за безпілотними літальними апаратами (огляд). Радіоелектроніка та системи зв'язку. 2020.
- 20.Кім С., Кім Ю. Виявлення 3D-об'єктів на основі глибокого навчання з використанням хмар точок LiDAR. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021.
- 21.Ланг А. та ін. PointPillars: швидкі енкодери для виявлення об'єктів з хмар точок. У: Матеріали конференції IEEE/CVF з комп'ютерного зору та розпізнавання образів (CVPR). 2019.
- 22.Ши С. та ін. PointRCNN: Генерація та виявлення 3D-пропозицій об'єктів з хмари точок. У: Матеріали конференції IEEE/CVF з комп'ютерного зору та розпізнавання образів (CVPR). 2019.
- 23.Ці К. Р. та ін. PointNet: глибоке навчання на множинах точок для 3D-класифікації та сегментації. У: Матеріали конференції IEEE з комп'ютерного зору та розпізнавання образів (CVPR). 2017.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Аналіз та адаптація методів виявлення безпілотних літальних апаратів із застосуванням LiDAR-технологій »

Обсяг пояснювальної записки: 63 ст., рисунків 2, таблиць 5, використано 23 джерела інформації

_____рік
(дата)

(підпис студента)