

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
РОЗРОБКА ЛАЗЕРНОЇ СИСТЕМИ СКАНУВАННЯ У ПРОСТОРИ
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи МТІОЛСу-22-1
Ренат КАРИМОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія оптичних та лазерних систем»
(повна назва освітньої програми)

Керівник зав. каф. ФОЕТ Олександр ГНАТЕНКО
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ _____
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма _____ «Інженерія оптоінформаційних та лазерних систем» _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Карімову Ренату Сергійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка лазерної системи сканування у просторі

затверджена наказом університету від « 23 » _____ травня _____ 2025 р. № 409 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 15 _____ липня _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи характеристики волоконного лазера; принципи когерентного випромінювання; формули розрахунку LIDAR-систем; структура системи LAMDRIS; схеми сканера та приймача; моделі когерентності та інтерференції; дані щодо атмосферного ослаблення.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Огляд сучасних лазерних систем просторового сканування та їх класифікація. 2 Дослідження фізичних основ лазерного випромінювання та когерентності. 3 Аналіз принципу дії та архітектури системи LIDAR.

4 Вивчення структури та компонентів інтегрованої системи LAMDRIS. 5 Розгляд алгоритмів обробки даних і машинного розпізнавання. 6 Побудова структурної моделі системи сканування; аналіз експериментальних характеристик та оцінка точності системи.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій _____

Демонстраційний матеріал – 11 слайдів _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про лазерні системи сканування простору та їх характеристик	06.05.25–21.05.25	Виконано
2	Дослідження фізичних основ лазерних скануючих систем	22.05.25–30.05.25	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик LIDAR систем	02.06.25–11.06.25	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів LIDAR систем	12.06.25–17.06.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	18.06.25–27.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	28.06.25–02.07.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	03.07.25–11.07.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	12.07.25–13.07.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	14.07.25–16.07.25	

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ зав. каф. ФОЕТ Олександр ГНАТЕНКО
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 44 с., 17 рис., 25 джерел, 1 додаток.

ВОЛОКОННИЙ ЛАЗЕР, ДЗЕРКАЛО, ДОВЖИНА КОГЕРЕНТНОСТІ, ІМПУЛЬСНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, КОГЕРЕНТНІСТЬ, ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ПРОСТОРОВЕ СКАНУВАННЯ, LIDAR.

Об'єкт дослідження – система сканування простору на основі лазерного випромінювання.

Мета роботи – дослідження фізичних принципів дії, конструктивних особливостей, функціональних характеристик та сучасних напрямів розвитку лазерних систем просторового сканування.

Метод дослідження – теоретичний аналіз літературних джерел, узагальнення фізичних принципів та конструкційних рішень, структурно-функціональне моделювання системи.

У процесі виконання роботи було вирішено такі завдання:

Проведено аналіз сучасних лазерних систем просторового сканування та визначено їх класифікацію за типом дії та конструкцією.

Розглянуто фізичні принципи просторового сканування за допомогою когерентного лазерного випромінювання.

Досліджено конструкцію та принцип функціонування системи LIDAR.

Розроблено структурну модель лазерної системи просторового сканування з використанням гальванометричного механізму та волоконного імпульсного лазера.

Оцінено потенціал застосування лазерного сканування у практичних задачах тривимірної візуалізації та моніторингу середовища, зокрема для дистанційного зондування складних і небезпечних територій.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 44 p., 17 fig. , 12 sources, 1 addition.

COHERENCE, COHERENCE LENGTH, FIBER LASER, LASER RADIATION, LIDAR, MIRROR, PULSED EMISSION, SPATIAL SCANNING

Object of research — spatial scanning system based on laser radiation.

Purpose of the work — to investigate the physical principles, structural features, functional characteristics, and modern development trends of laser-based spatial scanning systems.

Research method — theoretical analysis of scientific sources, generalization of physical principles and design solutions, and structural-functional modeling of the system.

The following tasks were solved in the course of the work:

The current state and classification of laser-based spatial scanning systems were analyzed.

The physical principles of spatial scanning using coherent laser radiation were examined.

The design and operating principles of the LIDAR system were studied.

A structural model of a laser spatial scanning system was developed using a fiber pulsed laser and galvanometric scanning mechanism.

The potential applications of laser scanning for 3D visualization and environmental monitoring were assessed, particularly for remote sensing of complex or hazardous areas.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Огляд та сучасний стан лазерних систем сканування простору	8
1.1 Актуальність теми	8
1.2 Лазерні скануючі системи: принцип дії та класифікація	9
1.3 Аналіз сучасних систем лазерного сканування	12
1.4 Система LAMDRIS як приклад інтегрованої платформи	13
2 Фізичні основи та автоматизація роботи системи	16
2.1 Фізичні принципи лазерного сканування	16
2.2 Формування тривимірного зображення за допомогою LIDAR.....	21
2.3 Структура та компоненти системи LAMDRIS	23
2.4 Алгоритми аналізу даних і машинного розпізнавання	25
3 Основні результати роботи MULTIPHYSICS	28
3.1 Конструкція системи сканування простору	28
3.1.1 Лазерний передавач	30
3.1.2 Механіка сканування	32
3.1.3 Оптоелектронний приймач	33
3.1.4 Процесор сигналів та контролер команд.....	34
3.2 Результати експерименту	35
Висновки	40
Перелік джерел посилання	42
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	45

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку технологій системи просторового сканування набувають особливого значення в різних сферах — від геодезії, архітектури й інженерного моделювання до оборонних і безпекових застосувань. Зростаюча потреба у швидкому, точному й безпечному отриманні інформації про навколишнє середовище зумовлює актуальність впровадження автоматизованих засобів з високою просторовою роздільною здатністю. Особливе місце в цьому контексті займають лазерні системи, здатні формувати тривимірні зображення у реальному часі на основі принципів когерентного лазерного випромінювання.

Одним із прикладів таких технологій є система LAMDRIS (Laser Advanced Mine Detection and Reconnaissance Integrated System), яка поєднує лазерне зондування, штучний інтелект і автономне управління безпілотними платформами. Ця система призначена для виявлення вибухонебезпечних об'єктів і розвідки у складних умовах, де традиційні методи є неефективними або небезпечними.

У межах даної кваліфікаційної роботи сформульовано концепцію лазерної системи сканування простору з урахуванням принципів, реалізованих у LAMDRIS. Основна увага зосереджена на аналізі її фізичних основ, структурної побудови, алгоритмів обробки даних та оцінці функціональних характеристик.

Об'єкт дослідження — лазерна система просторового сканування як інженерний комплекс. Предмет дослідження — технічна реалізація лазерної скануючої системи, включно з її основними компонентами, алгоритмами роботи та функціональними можливостями. Методологія дослідження передбачає аналіз літературних джерел, фізико-оптичних принципів роботи системи, побудову структурної схеми та моделювання її основних елементів.

Актуальність теми зумовлена потребою у створенні ефективних автономних засобів дистанційного зондування середовища для застосування в умовах підвищеного ризику — зокрема для інженерної розвідки, розмінування, екологічного моніторингу та цифрового картографування.

1 ОГЛЯД ТА СУЧАСНИЙ СТАН ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ СКАНУВАННЯ ПРОСТОРУ

1.1 Актуальність теми

У XXI столітті технології тривимірного сканування вже не сприймаються як щось футуристичне — вони поступово стають звичним інструментом у багатьох сферах. І це цілком логічно: у міру того, як різні галузі – від інженерії до оборонної промисловості – переходять до цифрових форматів, зростає потреба у точному та надійному аналізі простору. Паралельно з цим активно розвиваються безпілотні та роботизовані платформи, що, в свою чергу, вимагає створення систем, здатних працювати автономно та в режимі реального часу — тобто бачити, розуміти й реагувати на навколишнє середовище самостійно [1].

Особливо це важливо там, де точність – не просто питання зручності, а питання безпеки. Наприклад, після бойових дій, коли території залишаються небезпечними через замінування, людині важко – а подекуди просто неможливо – виконати розвідку без ризику. У таких випадках застосовують дистанційно керовані або повністю автономні системи. Але традиційні засоби, на кшталт металошукачів чи візуального огляду, мають свої обмеження – і з точки зору глибини аналізу, і просторової точності. Саме тут у гру вступають лазерні сканери, зокрема технології LIDAR.

Сучасні LIDAR-системи вміють «бачити» навколишній світ з точністю до кількох сантиметрів, причому незалежно від освітлення або погодних умов. Це можливо завдяки тому, що вони працюють на активному лазерному випромінюванні – тобто не потребують стороннього джерела світла. Ба більше: лазер легко «пробиває» навіть крізь рослинність, дозволяючи виявляти об'єкти, які сховані або частково заглиблені в ґрунт [2]. Сама технологія при цьому доволі гнучка і її можна інтегрувати в дрони, наземні платформи або мобільні роботи без значних змін у структурі.

Однією з найцікавіших реалізацій у цьому напрямку є система LAMDRIS – лазерна автоматизована мультиспектральна платформа для розвідки і сканування.

В її основі ф комбінація LIDAR-модуля, нейромережевої обробки даних та блоку автономного управління. Завдяки цьому вона здатна ефективно діяти в умовах, де присутність людини або неможлива, або надто ризикована. У системі інтегруються кілька типів даних: просторові координати, зображення, спектральна інформація – усе це обробляється в реальному часі. Як результат – створення точної цифрової карти місцевості з можливістю виділення небезпечних зон ще до того, як туди зайде сапер або техніка.

1.2 Лазерні скануючі системи: принцип дії та класифікація

Лазерні скануючі системи – це не просто складні технічні пристрої, а потужний інструмент, що дозволяє зчитувати навколишній простір з вражаючою деталізацією. В основі їх роботи – використання когерентного лазерного випромінювання, завдяки якому можна точно визначати відстань до поверхонь навколо [3]. Суть проста: система випромінює лазерний імпульс, зазвичай у ближньому інфрачервоному діапазоні від 0,75 мкм до 1,4 мкм, який, відбившись від об'єкта, повертається до приймача. Вимірявши, скільки часу пройшло або як змінилася фаза сигналу, пристрій обчислює відстань до точки. Повторивши цей процес для тисяч – або навіть мільйонів – точок, він формує повноцінну тривимірну модель середовища.

Фізична суть роботи таких систем базується на двох основних підходах: імпульсному та фазовому:

- 1) перший визначає час, за який світловий імпульс проходить до об'єкта і назад;
- 2) другий – оцінює зміну фази хвилі між відправленим і прийнятим сигналом.

Вибір методу залежить від ситуації, імпульсний підхід зазвичай забезпечує більшу дальність, тоді як фазовий – вищу точність, але на коротких дистанціях, також, сучасні розробки часто комбінують обидва принципи, досягаючи балансу між точністю і масштабом сканування.

Серед різноманітних реалізацій лазерних скануючих систем окремо виділяють лінійні та панорамні сканери – два підходи до побудови оглядової геометрії пристрою. Обидва типи мають свої конструктивні особливості, сценарії застосування та обмеження, що визначають їхню придатність до конкретних завдань.

Сканери поділяються за способом «бачення» простору на лінійні та панорамні:

Лінійні сканери формують лазерний промінь, який охоплює вузький сектор простору – зазвичай це лінія або обмежений кут поля зору. Цей тип особливо зручний для задач точного вимірювання в контрольованих умовах або в обмеженому просторі (рис. 1.1).

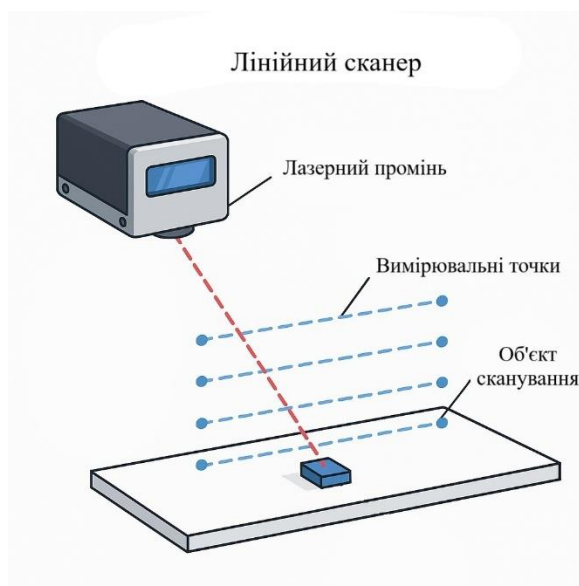


Рисунок 1.1 – Пристрій із вузьким сектором сканування, який потребує переміщення носія або об'єкта для отримання повної просторової моделі

Панорамні сканери, на відміну від лінійних, здатні охоплювати навколишній простір майже повністю – до 360° у горизонтальній площині (рис. 1.2). Вони працюють за принципом обертання або з використанням дзеркал, що розсіюють лазерне випромінювання по колу. Завдяки цьому вони можуть

сканувати довкілля без необхідності переміщення самого пристрою.

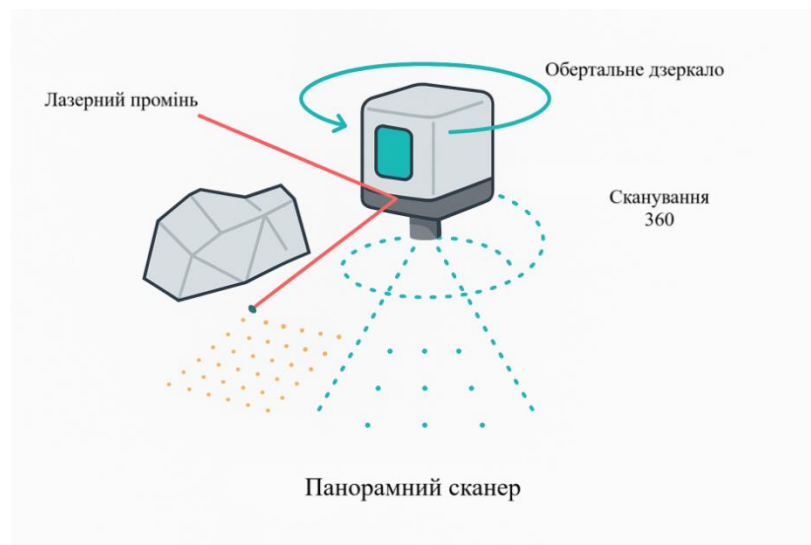


Рисунок 1.2 – Система з повнокутовим (до 360°) оглядом, що дозволяє формувати тривимірну модель середовища без переміщення сканера

На практиці різниця між цими сканерами впливає на вибір платформи, до якої вони під'єднуються. Наприклад, лінійні сканери чудово підходять для промислових задач – на кшталт відстеження об'єктів на стрічці чи перевірки геометрії деталей. Натомість панорамні LIDAR-системи зазвичай використовують у дронах, роботах і безпілотних авто – там, де потрібен повний огляд середовища в динаміці.

Сучасні тенденції у розробці таких систем орієнтовані на ще більшу деталізацію. Йдеться про щільність вимірювань, точність координат, швидкість обробки. Паралельно впроваджуються алгоритми штучного інтелекту, які допомагають розпізнавати об'єкти автоматично. Інтеграція з камерами, спектральними сенсорами та іншими джерелами даних дає змогу будувати більш комплексні моделі — фактично створювати цифрові двійники середовища. Усе це робить лазерне сканування незамінним елементом у складі сучасних інтелектуальних платформ.

1.3 Аналіз сучасних систем лазерного сканування

Сучасні лазерні скануючі системи – це результат тривалого розвитку одразу кількох напрямків: оптоелектроніки, цифрової обробки сигналів, мобільної робототехніки й програмного забезпечення.

На ринку є чимало виробників, і кожен пропонує щось своє. Наприклад, Velodyne HDL-64E – класичний варіант для безпілотного транспорту: широкий кут огляду, висока швидкість збору інформації. Riegl, у свою чергу, робить акцент на точності та стабільності роботи навіть у жорстких кліматичних умовах – їх системи часто застосовуються для топографічної зйомки в горах або пустелях. А ось Leica Pegasus – це вже мобільна платформа зі вбудованими GPS, інерційною навігацією й відеокамерами, зручна для 3D-моделювання міського середовища [4].

Технічно системи відрізняються за кількома важливими параметрами: частотою сканування, кількістю точок у хмарі, робочою відстанню, точністю вимірювання, діапазоном хвиль і навіть способом обробки отриманих даних. Деякі з них можуть обробляти понад мільйон точок за секунду, охоплюючи до 360° по горизонталі і до 50° по вертикалі. Це дозволяє будувати не просто «картинку», а справжню просторову модель – з урахуванням рельєфу, об'єктів, доріг, дерев чи навіть людей.

Особливо цікавий напрям – це лазерні системи на дронах. Там усе складніше: треба досягти компромісу між вагою, енергоспоживанням і точністю. Приміром, YellowScan Vx20 або Rousescene UAV Lidar Pod добре підходять для зйомки лісів, схилів, берегових зон чи інших важкодоступних локацій. Завдяки тому, що такі сканери можуть працювати на низьких висотах і «бачать» крізь листя, вони часто стають кращою альтернативою аерофотозйомці – особливо у зонах, де стандартна оптика безсила [5].

Ще один напрям, який набирає обертів – мультисенсорні системи. Тобто коли лазерне сканування поєднується з камерами, тепловізорами або навіть гіперспектральними датчиками. Це відкриває додаткові можливості, наприклад, можна не тільки побачити форму об'єкта, а й дізнатися про його температуру,

склад матеріалу або вологість поверхні. У гуманітарному розмінванні це критично важливо – зміни ґрунту або температурні аномалії можуть вказувати на наявність прихованих мін.

Загалом, ринок рухається у бік менших, легших, дешевших, але розумніших систем. Зокрема, набирають популярності твердотільні LIDAR – вони не мають механічних елементів, тож менш чутливі до вібрацій і краще підходять для масового виробництва. А ще все частіше алгоритми штучного інтелекту вбудовуються безпосередньо у сканери, отримані дані обробляються одразу без потреби передавати гігабайти інформації до сервера. Це особливо важливо для автономних систем, які працюють у реальному часі.

1.4 Система LAMDRIS як приклад інтегрованої платформи

Платформи, здатні в режимі реального часу аналізувати просторову обстановку, дедалі активніше використовуються там, де потрібна висока точність, автономність і гнучкість. Їхня роль особливо важлива в ситуаціях, де звичайні підходи вже не дають потрібного результату. Один із яскравих прикладів такого підходу – система LAMDRIS (Laser Automated Mine Detection and Reconnaissance Integrated System) (рис. 1.3). Це багатокomпонентна платформа, яка поєднує різні модулі для вирішення складних завдань, від дистанційного зондування місцевості до виявлення вибухонебезпечних об'єктів і створення тривимірних моделей у просторі [6].

Лазерна система сканування, закріплена на безпілотному літальному апараті, випромінює імпульси в напрямку ґрунту з метою виявлення щільнісних відхилень або форм, що можуть свідчити про втручання в ґрунт (ймовірно замаскована міна) або інших вибухонебезпечних об'єктів. Після збору даних дроном, запускається процес глибинного аналізу отриманих даних за допомогою нейронних мереж. Саме тут відбувається класифікація просторової інформації, виявлення аномалій і розпізнавання об'єктів на основі попередньо навчених моделей. Наступний крок – остаточне завершення ідентифікації підозроливих

аномалій, точна геоприв'язка виявлених об'єктів і побудова тривимірної карти місцевості з позначенням небезпечних зон. Цей етап критично важливий для передачі результатів операторам або автоматизованим системам планування розмінування.



Рисунок 1.3 – Візуалізація загального принципу роботи системи LAMDRIS у контексті лазерного дистанційного зондування та просторового аналізу для виявлення мін і небезпечних об'єктів

Вона є прикладом глибокої інтеграції апаратного і програмного забезпечення, сенсорних модулів, засобів обробки даних у реальному часі та автономних або напівавтономних транспортних платформ. Її основою виступає твердотільний LIDAR-сканер з високою щільністю просторового охоплення, здатний працювати у поєднанні з GNSS-приймачем, інерціальною навігаційною системою (IMU) та візуальними камерами. Така конфігурація дозволяє LAMDRIS не лише фіксувати координати поверхні, а й створювати повноцінні 3D-реконструкції з прив'язкою до географічної системи координат [7].

Унікальною особливістю цієї платформи є її здатність до адаптації в різних

умовах місцевості. Вона може бути змонтована як на наземному роботі-гусеничнику, так і на безпілотному літальному апараті типу квадрокоптер або конвертоплан. Це забезпечує оперативне обстеження територій, які є небезпечними або важкодоступними для звичайного персоналу [8]. В рамках системи застосовуються алгоритми попередньої обробки даних на місці збору, що суттєво знижує обсяг інформації, яку потрібно передавати, та дозволяє виявляти потенційно небезпечні об'єкти вже на етапі польового сканування.

Окрему увагу заслуговує застосування методів машинного навчання та глибокої нейронної обробки сигналів. Завдяки використанню попередньо навчених моделей система здатна класифікувати скановані об'єкти за ознаками, що характерні для мін, снарядів або інших техногенних структур, не вимагаючи ручного втручання у процес ідентифікації. Це дозволяє зменшити час реагування та значно підвищити безпеку операторів, що працюють на територіях із підвищеним рівнем загрози.

LAMDRIS є відкритою системою, що дозволяє її масштабування та адаптацію під конкретні задачі. Наприклад, може бути встановлено модулі гіперспектрального аналізу, температурного моніторингу, вологісного зондування, або лазерного спектроскопічного аналізу матеріалів. У поєднанні з цифровим плануванням місій, точним позиціонуванням і енергетично оптимізованим маршрутом сканування така система здатна виконувати повноцінне картографування й розвідку в автоматизованому режимі.

2 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ РОБОТИ СИСТЕМИ

2.1 Фізичні принципи лазерного сканування

Основою функціонування лазерних скануючих систем є явища, що виникають при взаємодії світлового випромінювання з речовиною. Найважливішими серед них є поглинання, вимушене (індуковане) та спонтанне випромінювання, які описуються через так звані коефіцієнти Ейнштейна. Ці процеси відбуваються на рівні атомів та молекул і визначають, яким чином електромагнітне поле впливає на енергетичні стани частинок [9].

Коли фотон з енергією $h\nu$ відповідає різниці енергетичних рівнів частинки, він може бути поглинутий, що переводить частинку з нижчого рівня E_1 на вищий E_2 . Імовірність такого переходу залежить від щільності спектральної енергії поля $\rho(\nu)$ і описується коефіцієнтом поглинання B_{12} :

$$\frac{dP_a}{dt} = B_{12}\rho(\nu). \quad (2.1)$$

Аналогічно, частинка у збудженому стані може під дією зовнішнього поля здійснити вимушений перехід назад на нижчий рівень, випромінюючи фотон тієї ж енергії. Такий фотон має таку ж фазу, напрямок і частоту, що і початкове поле – це є ключовим принципом лазерної когерентності. Його ймовірність описується формулою 2.1 з коефіцієнтом B_{21} .

Крім того, у відсутності зовнішнього поля збуджена частинка з певною імовірністю A_{21} може спонтанно випромінити фотон – це спонтанне випромінювання, яке описується за формулою:

$$\frac{dP_{sp}}{dt} = A_{21}. \quad (2.2)$$

На рисунку 2.1 ілюструється три фундаментальних процеси взаємодії фотонів з атомами або молекулами в двохрівневій енергетичній системі [10].

Перший процес – поглинання, він говорить що молекула, яка перебуває в нижчому енергетичному стані E_1 , поглинає фотон з енергією $h\nu$ і переходить у збуджений стан E_2 , але є умова, процес відбувається тільки, коли енергія фотона точно відповідає різниці енергетичних рівнів: $h\nu = E_2 - E_1$ [9].

Що до другого процесу, його назва – вимушене (індуковане) випромінювання. Збуджена молекула в стані E_2 під дією зовнішнього електромагнітного поля з тією ж частотою ν може випромінити фотон і перейти назад у стан E_1 . Новоутворений фотон має ту ж саму фазу, напрямок і частоту, що й початковий, що лежить в основі принципу роботи лазерів.

Останній процес третій – спонтанне випромінювання, говорить про молекулу, яка перебуваючи в збудженому стані E_2 може самостійно випромінити фотон і перейти в основний стан E_1 без зовнішнього збурення. Випромінювання відбувається в довільному напрямку, з випадковою фазою.

Взагалі, рисунок демонструє принципові відмінності між когерентними (вимушене) та некогерентними (спонтанне) процесами випромінювання

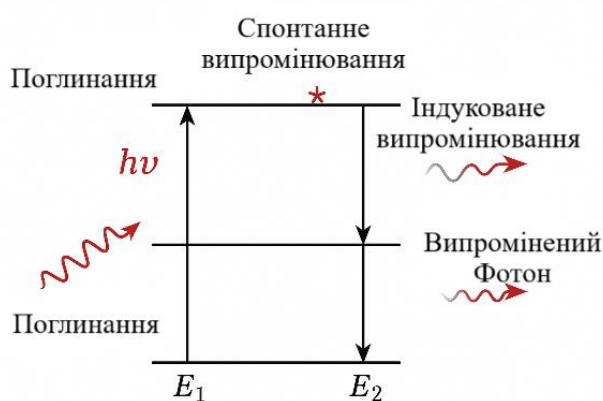


Рисунок 2.1 – Двоенергетична модель взаємодії частинки з електромагнітним полем: стрілка вгору – поглинання фотона, вниз із зірочкою – спонтанне випромінювання, вниз уздовж лінії світла – вимушене випромінювання

Ці механізми взаємодії лежать в основі роботи лазера. У лазерному

резонаторі створюються умови, за яких відбувається багаторазове індукування випромінювання фотонів в одній і тій самій моді. Це забезпечує високу когерентність, монохроматичність і потужність лазерного пучка [11].

Особливо важливою характеристикою лазерного випромінювання є когерентність – тобто узгодженість фазових коливань хвиль у просторі та часі. Вона визначає можливість створення чіткої інтерференційної картини та високоточної локалізації відбитого сигналу. У лазерному скануванні когерентність визначає здатність системи виявляти малі просторові деталі й визначати глибину з високою точністю [12].

Когерентність світла зображена на рисунку 2.2 – це міра впорядкованості фаз електромагнітних хвиль. Вона ділиться на двучасову та просторову. Обидва типи є фундаментальними для створення чітких інтерференційних і лазерних ефектів.

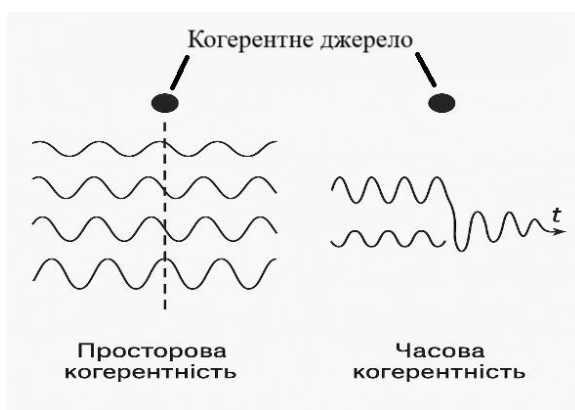


Рисунок 2.2 – Часова та просторова когерентності

Вгорі схеми показано хвильові пакети, що йдуть у одному напрямку. Вони мають добре визначену фазу впродовж певного інтервалу часу Δt , який називається часом когерентності. Довжина хвильового пакету в цьому випадку визначає довжину когерентності $L = c/\Delta t$, де c – швидкість світла. Ширший спектральний діапазон випромінювання зумовлює коротшу довжину когерентності, а монохроматичне (вузькоспектральне) джерело формує довший хвильовий пакет, що забезпечує вищу ступінь когерентності.

Часова когерентність – визначається довжиною когерентності. Наприклад, одномодовий гелій-неоновий лазер має довжину когерентності до 50 м.

Визначення довжини когерентності $L_{\text{ког}} = c/\Delta\nu$;

Просторова – характеризує поперечну площину, в межах якої хвилі залишаються фазово узгодженими.

Уявімо, що ми спостерігаємо за світлом не як за абстрактною хвилею, а як за цілеспрямованим сигналом, який має свою логіку і ритм. Саме це допомагає зрозуміти дослід Юнга, зображений на рисунку 2.3 – простий експеримент, який розкриває когерентність.

Коли світло проходить крізь дві вузькі щілини, воно створює на екрані візерунок із темних і світлих смуг. Але цей візерунок з'явиться лише тоді, коли хвилі «узгоджені» між собою — тобто когерентні. Це не просто цікава оптична гра – це фізичне підтвердження того, що джерело світла має бути впорядкованим, ритмічним, а не хаотичним.

Для лазерних скануючих систем це має практичне значення. Просторова когерентність визначає чіткість і стабільність лазерного пучка. Без неї було б неможливо точно вимірювати відстані, формувати тривимірні моделі або розпізнавати дрібні деталі на складних поверхнях.

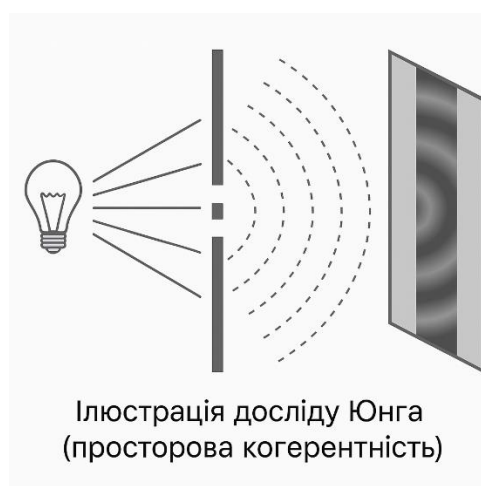


Рисунок 2.3 – Схема двощілинного експерименту

Джерело світла (монохроматичне або частково когерентне) освітлює дві вузькі щілини S_1 і S_2 , які виконують роль вторинних когерентних джерел. Хвилі, що проходять через ці щілини, інтерферують у точках екрану P , створюючи інтерференційну картину – чергування світлих і темних смуг. У центрі картини (там, де оптичні шляхи рівні) спостерігається максимум інтенсивності. У точках, де різниця ходу дорівнює півдовжині хвилі – мінімум.

Когерентність у досліді дозволяє забезпечити чітку, контрастну інтерференційну картинку, якщо розмір джерела великий або воно має широкий спектр, вона знижується та інтерференційна картинка стає розмитою або зовсім зникає.

Описати інтерференцію в досліді Юнга можна за формулою:

$$y_m = \frac{dm\lambda}{L}, \quad (2.3)$$

де y_m – відстань від центрального максимуму до m -го максимуму на екрані;

d – відстань між щілинами;

m – порядок інтерференційного максимуму (1, 2, 3..);

λ – довжина хвилі світла;

L – відстань від щілин до екрана.

Формула дозволяє знайти, де на екрані з'являються світлі смуги в результаті інтерференції когерентного світла.

Ці явища створюють передумови для побудови систем лазерного сканування, здатних формувати високоточні тривимірні зображення середовища, що особливо важливо для задач дистанційного зондування, картографії, автономної навігації та розмінування.

Формула дозволяє знайти, де на екрані з'являються світлі смуги в результаті інтерференції когерентного світла [13].

Ці явища створюють передумови для побудови систем лазерного сканування, здатних формувати високоточні тривимірні зображення середовища,

що особливо важливо для задач дистанційного зондування, картографії, автономної навігації та розмінування.

2.2 Формування тривимірною зображення за допомогою LIDAR

Сучасний LIDAR – це не просто лазерний далекомір. Це складна система, що об'єднує точну оптику, високочастотну електроніку, математичну аналітику та лазерну фізику. Від правильного вибору джерела й конфігурації резонатора до алгоритмів інтерпретації хмари точок – усе має значення [13]. Саме тому створення LIDAR-системи – це завжди інженерне мистецтво, а не лише технологія. Насправді за нею стоїть вражаюча система, яка здатна буквально «бачити» простір – швидко, точно і в деталях, яких не помітить око. Завдяки їй автономні авто впевнено рухаються дорогами, дрони створюють 3D-карти місцевості, а інженери можуть в режимі реального часу будувати цифрові копії світу [14].

Принцип дії LIDAR надзвичайно витончений. Система випромінює короткий лазерний імпульс, який відбивається від об'єкта і повертається назад до приймача. Знаючи швидкість світла, ми легко можемо обчислити відстань за формулою:

$$R = \frac{c \cdot \tau}{2}, \quad (2.4)$$

де τ – час між випромінюванням і прийомом сигналу;

c – швидкість світла.

Але просто виміряти відстань – цього замало. Щоб побудувати об'ємну картину, потрібно знати ще й напрямок, куди саме дивився лазер у момент вимірювання. І тут у гру вступають гальванометри, обертові дзеркала або MEMS-елементи, які змінюють напрямок пучка.

Для LIDAR критично важливо, щоб джерело світла було когерентним, стабільним і достатньо вузькоспектральним [14]. Саме тому використовують

спеціалізовані лазери, наприклад:

- діодні лазери, в яких можна тонко налаштувати довжину хвилі;
- лазери на комбінаційному розсіянні, що дозволяють працювати в широкому інфрачервоному діапазоні;
- лазери з перестроюванням, які, змінюючи температуру чи струм, зсувають максимум спектра на кілька нанометрів.

Коли лазер має вузьку спектральну смугу $\Delta\lambda$, його довжина когерентності – тобто відстань, на якій хвилі залишаються «в фазі» – зростає:

$$L_c = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (2.5)$$

І це не просто красива фізика, велика довжина когерентності дозволяє будувати LIDAR з фазовим інтерферометричним аналізом – у разі точніший, ніж класичний імпульсний метод.

Завдяки точним відстаням і координатам лазерного пучка у просторі формується хмара точок (point cloud). Уявіть собі, що кожна крапка – це відображена лазерна «постріл», що повернувся назад. А тепер помножте це на мільйони. І от ми вже маємо повноцінну тривимірну модель об'єкта чи ландшафту.

Координати кожної точки легко обчислити за допомогою формули 2.6:

$$P_i = \begin{bmatrix} R_i \cdot \cos \theta_i \cdot \cos \phi_i \\ R_i \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \phi_i \\ R_i \cdot \sin \phi_i \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

де R_i – виміряна відстань;

θ_i, ϕ_i – кути сканування.

Після цього програмні алгоритми «зшивають» точки в поверхні, згладжують, доповнюють кольорами та щільністю – і ви вже бачите 3D-світ майже як очима.

Сучасні LIDAR-системи можуть «ловити» навіть одиничні фотони –

завдяки фотодетекторам на основі лавинних діодів (APD) або кремнієвих фотопомножувачів [11]. Часова роздільна здатність таких сенсорів — десятки пікосекунд. Це дозволяє визначати глибину на відстані сотень метрів із точністю до сантиметра, а в деяких випадках – навіть міліметра.

Особливу роль тут відіграють оптичні резонатори, які «вибирають» потрібну моду з усього спектра. Щоб лазер генерував лише одну моду, потрібно забезпечити, щоб вона мала найменші втрати – і тоді саме вона й «виживе»:

$$Q = \frac{2\pi\nu}{\beta}, \quad (2.7)$$

де Q – добротність резонатора; β – загальні втрати енергії в моді.

Якщо лазерний резонатор спроектований правильно, то майже вся енергія буде концентруватися в одній моді – з високою когерентністю та стабільністю.

2.3 Структура та компоненти системи LAMDRIS

Система LAMDRIS (Laser Mapping and Detection Reconnaissance Integrated System) є інтегрованою лазерною платформою, призначеною для просторового сканування, виявлення і картографування об'єктів у складних умовах. У своїй основі вона поєднує високоточний LIDAR-модуль, систему позиціонування та орієнтації, бортове керування, а також алгоритми автоматичного розпізнавання і взаємодії з безпілотними платформами. Нижче розглянемо ключові структурні компоненти системи та їхню взаємодію (рис. 2.4) [15].

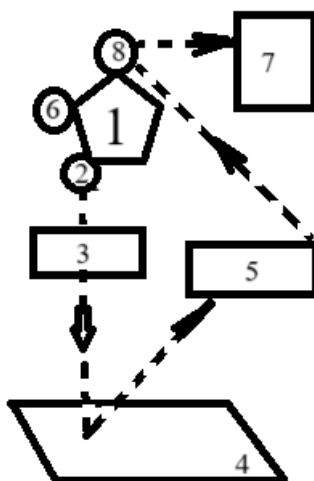


Рисунок 2.4 – проста схема LAMDRIS

Компоненти системи: 1) – безпілотний носій (дрон); 2) – джерело лазерного випромінювання (лазер) – серце системи, яке формує вузьконаправлений, когерентний промінь, що використовується для зондування простору. В системі LAMDRIS часто використовують діодні або твердотільні лазери з перестроюваною довжиною хвилі, що дозволяє адаптуватися до різних умов середовища; 3) – оптична система для сканування простору в LAMDRIS реалізується за допомогою гальванометричних дзеркал або MEMS-елементів, які відхиляють лазерний промінь у вертикальній і горизонтальній площинах. Цей механізм забезпечує побудову 2D або 3D карти місцевості з просторовим кроком, який регулюється в залежності від задачі – від детального зображення на малих висотах до оглядового моніторингу з БПЛА. Оптична система також включає телескопічний блок, що збільшує відстань фокусування та полегшує детекцію об'єктів малого розміру (наприклад, протипіхотних мін або елементів інженерних загороджень); 4) – об'єкт сканування; 5) – після реєстрації зворотного сигналу, фотодетектор перетворює його в електричний імпульс, який аналізується цифровим процесором. Після прийняття зворотнього сигналу, його аналізує модуль обробки сигналу. Час затримки між передачею і прийомом променя визначає відстань до об'єкта за класичною формулою 2.4:

$$d = \frac{c\Delta t}{2}, \quad (2.4)$$

де c – швидкість світла;

Δt – час затримки сигналу.

Використання швидкісних аналого-цифрових перетворювачів дозволяє зменшити похибку вимірювання до одиниць сантиметрів. У більш просунутих варіантах система може також враховувати амплітуду сигналу для аналізу характеристик поверхні (інтенсивність, відбивна здатність, поглинання тощо);

б) – блок живлення та охолодження Забезпечує стабільну роботу лазера, детектора та електроніки. Для деяких елементів системи, зокрема високопотужних лазерів, може знадобитися активне охолодження; 7) – програмне забезпечення централізовано керує всією системою, збирає дані з сенсорів, виконує побудову тривимірного зображення, візуалізацію та архівацію. Може мати модулі автоматичного розпізнавання об'єктів і взаємодії з БПЛА; 8) – модуль позиціонування та зв'язку слугує для точного суміщення даних лазерного сканування із координатною сіткою LAMDRIS включає GNSS-приймач (GPS/GLONASS) та інерціальну навігаційну систему (INS). Завдяки цій зв'язці забезпечується:

- геоприв'язка кожної точки хмари LIDAR-даних;
- корекція похибок при нахилі або коливаннях платформи;
- побудова точних цифрових моделей поверхні (DSM/DTM) [16].

2.4 Алгоритми аналізу даних і машинного розпізнавання

Функціональна ефективність сучасних лазерних систем сканування значною мірою залежить не лише від точності вимірювань, а й від здатності оперативно інтерпретувати отримані дані. У контексті системи LAMDRIS, яка використовується для просторового зондування та виявлення потенційно небезпечних об'єктів, особливе значення набувають алгоритми обробки, фільтрації та автоматичного розпізнавання на основі машинного навчання.

На першому етапі аналізу після збору хмари точок здійснюється попередня обробка, що включає в себе видалення шумів, нормалізацію координат, вирівнювання з урахуванням позиційної інформації та, за потреби, зшивання кількох проходів сканування. Для зменшення обсягів даних без втрати ключової інформації застосовуються методи вокселізації або семантичного ущільнення. Це дозволяє зберегти найбільш інформативні ознаки, необхідні для наступного етапу – сегментації.

Сегментація хмари точок виконується з використанням евристичних методів (наприклад, *region growing*, *DBSCAN*) або нейронних мереж, навчених на великій кількості зразків. Основна мета – виокремити із сукупності точок ті, що можуть відповідати конкретним об'єктам або аномаліям. У випадку гуманітарного розмінування такими об'єктами можуть бути залишки металевих корпусів, порушення структури ґрунту, геометрично невласиві елементи у природному середовищі.

Після сегментації дані подаються на класифікаційний модуль, в основі якого зазвичай лежать глибокі згорткові нейронні мережі (*CNN*) або графові нейронні мережі (*GNN*), що дозволяють ефективно працювати з нерегулярною структурою хмари точок. У новітніх реалізаціях широко використовуються архітектури типу *PointNet*, *PointCNN* або *RandLA-Net*, здатні виконувати класифікацію в режимі реального часу з високим ступенем точності. Це дозволяє не лише виділяти об'єкти, але й ідентифікувати їх тип – природний, техногенний, потенційно небезпечний тощо [16].

Для забезпечення стійкості до зовнішніх факторів – зокрема змін освітлення, рослинності, погодних умов – моделі навчаються на мультиспектральних або синтетично згенерованих даних. Важливим компонентом є також система контекстної обробки, яка враховує просторову структуру сцени та логічні зв'язки між об'єктами. Наприклад, вибухонебезпечний предмет частіше розташовується поблизу траншей або старих інженерних споруд, що може бути зафіксовано через аналіз топології.

Після класифікації відбувається інтерпретація результатів, яка реалізується

у вигляді тривимірної мапи ризику, таблиць з координатами потенційних цілей або команд для платформи щодо зміни траєкторії, сканування з вищою щільністю або позначення зони для ручної перевірки. При необхідності результати можуть бути інтегровані з картографічними сервісами, GIS-системами або військовими інформаційними платформами для подальшого прийняття рішень [17].

Застосування методів штучного інтелекту в системі LAMDRIS значно скорочує час на аналіз великих обсягів даних, підвищує точність виявлення аномалій та знижує рівень помилкових спрацьовувань. Водночас розробка таких алгоритмів вимагає якісного навчального датасету, сценарного моделювання та постійного оновлення моделей відповідно до змін у середовищі застосування.

3 ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

3.1 Конструкція системи сканування простору

Максимальна дальність, точність кута та початковий час збору даних є найважливішими факторами для проектування лідарної системи [18]. Архітектурна схема лідара показана на рисунку 3.1. Він складається з імпульсного волоконного лазера, скануючого механізму, оптичного приймача, квадрантного лавинного фотодіода (QAPD), процесора сигналів та контролера команд.

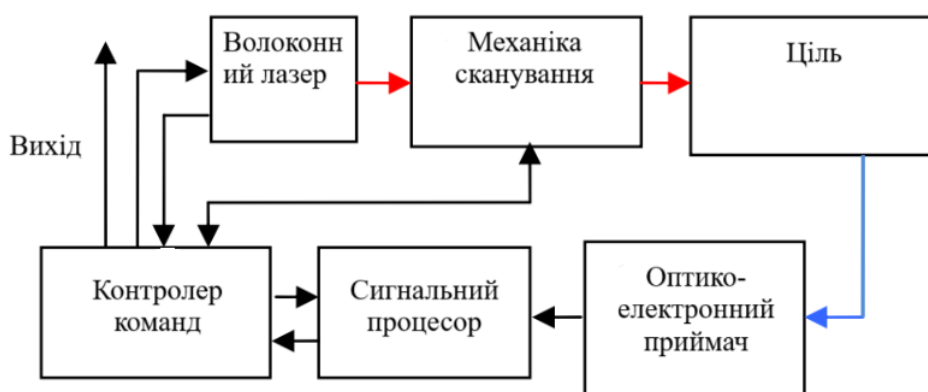


Рисунок 3.1 – Схема конструкції системи

Вихідні лазерні імпульси волоконного лазера з довжиною хвилі 1030 нм відбиваються швидким керованим дзеркалом (FSM) та двовісним обертовим дзеркалом для освітлення взаємодіючої цілі. Тривалість лазерного імпульсу становить 7 нс. Зворотний лазерний промінь збирається телескопом діаметром 50 мм. Сонячний фільтр зі смугою пропускання 3 нм вставляється перед детектором, а також використовується кремнієвий QAPD (QA4000, First Sensor) діаметром 2 мм. Розроблено цифровий сигнальний процесор (DSP) для отримання інформації про кут та дальність. Контролери команд також базуються на DSP для керування системою сканування та синхронізації лазерного тригера та оцифрування сигналу [18].

Кооперативна ціль складається з 34 ретрорефлекторів, а ефективна площа відбиття становить 50 см². Весь робочий процес лідара можна розділити на три

етапи, як показано на рисунку 3.2 – це пошук, захоплення та позиціонування, а також відстеження цілі. Найвища відносна швидкість цілі та аналіз кута лінії зору лідара. Відносне кутове положення, швидкість та відстань до цілі можна виміряти більш точно. На першому етапі діапазон кутів огляду лідара становить $120^\circ \times 120^\circ$. Кут розбіжності лазера встановлено на рівні 10 мрад, а частота повторення – 50 кГц. Щоб забезпечити відсутність сліпої зони в області пошуку, сусідня лазерна пляма сканування має перекриття на дві третини [19].

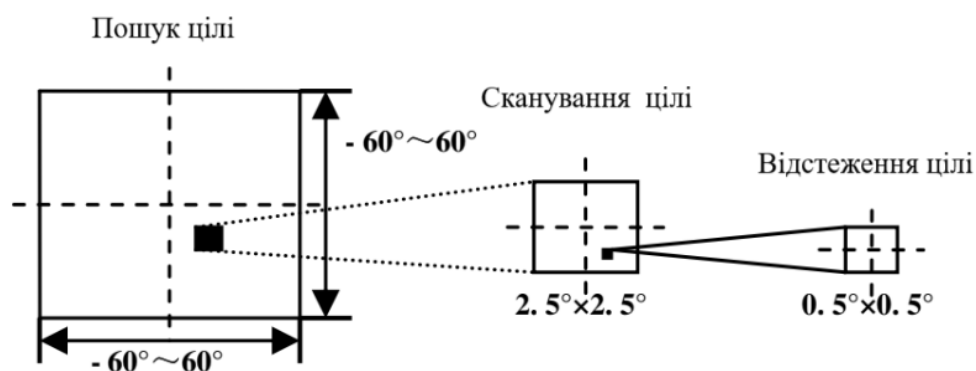


Рисунок 3.2 – Схема системної архітектури лідара АРТ

Враховуючи похибку кутового положення та коливання обертового двигуна, кут кроку сканування двигуна встановлено на 2,6 мрад, а швидкість сканування у вертикальному напрямку – 21 Гц. На рисунку 3.3 показано карту процедури сканування.

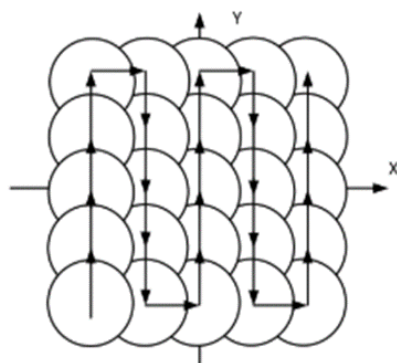


Рисунок 3.3 – Спосіб сканування прямокутного растру

Швидкість обертання двигуна, що обертається у вертикальному напрямку (Y), значно більша за швидкість обертання двигуна, що обертається у горизонтальному напрямку (X). Якщо виявлено три безперервні ефективні сигнали, система підтверджує, що ціль фактично виявлено. Згідно з даними фотоелектричних енкодерів валів двигунів, кутове положення записується та приблизно розраховується. Оскільки максимальна дальність становить 20 км, а частота повторення лазерних імпульсів – 50 кГц, точну дальність важко отримати через її неоднозначність. Щоб отримати точніше положення, система переходить до наступного етапу. На другому етапі для сканування цілі використовується кут огляду лідарної системи. Поле зору сканування (FOV) FSM становить $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, а швидкість сканування становить 100 Гц. Кут сканування такий самий, як і кут огляду приймального телескопа, щоб ціль залишалася в полі зору. Частота повторення лазера зменшується до 5 кГц, щоб подолати неоднозначність дальності. Різні амплітуди QAPD використовуються для обчислення точного кутового положення, а сумарний сигнал чотирьох пікселів використовується для вимірювання відносної відстані. На останньому етапі поле зору системи ART лідара становить $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ [19]. Двовісні двигуни та FSM керуються для спостереження за цілью через аналіз кута лінії зору лідара та цілі в полі зору. Відносне кутове положення, швидкість та відстань до цілі можна виміряти більш точно.

3.1.1 Лазерний передавач

Як кандидат на роль передавача було обрано імпульсний волоконний лазер з високою частотою повторення. Імпульсний волоконний лазер є набагато надійнішим, має високу ефективність та має енергію імпульсів та частоту повторення, які легко змінити. Імпульсний волоконний лазер налаштовано на основі структури МОРА (підсилювач потужності головного генератора).

Налаштування імпульсного волоконного лазера показано на рисунку 3.4.

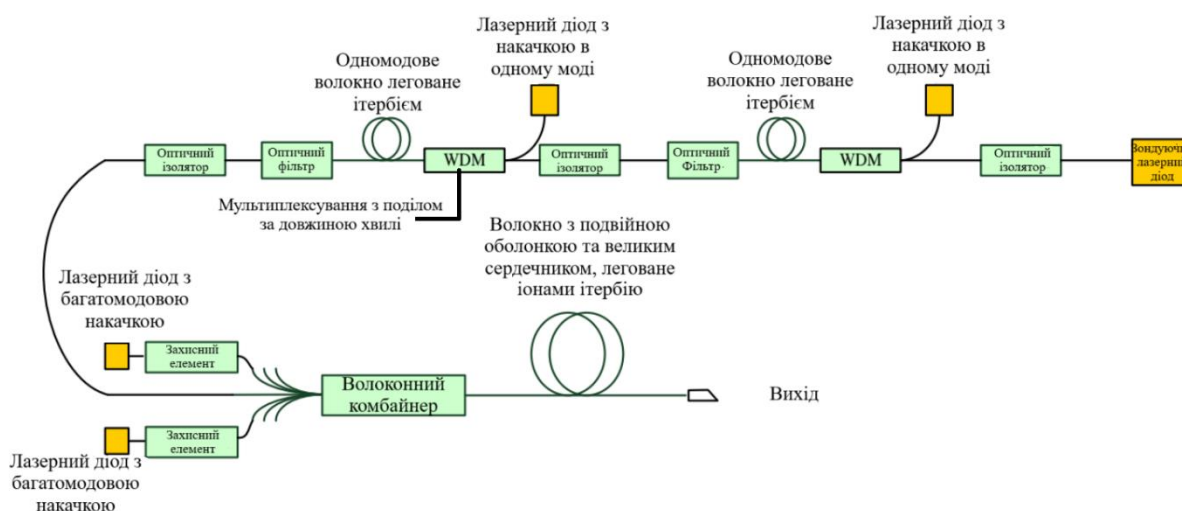


Рисунок 3.4 – Налаштування оптоволоконного імпульсного підсилювача

Довжина хвилі лазера розрахована на 1030 нм, оскільки ефективність відгуку кремнієвого QAPD приблизно вдвічі перевищує ефективність звичайної довжини хвилі 1064 нм [20]. Енергію лазера та частоту повторення можна регулювати відповідно до відносної відстані до цілі. Лазер працює з частотою повторення 50 кГц та максимальною енергією. Після того, як ціль знайдено, частота повторення лазера змінюється до 5 кГц, а енергія лазера поділяється на 10 рівнів. Лазерна енергія перемикається на різні рівні відповідно до відносного. На рисунку 3.5 показано різну енергію кожного рівня на частотах 5 та 50 кГц.

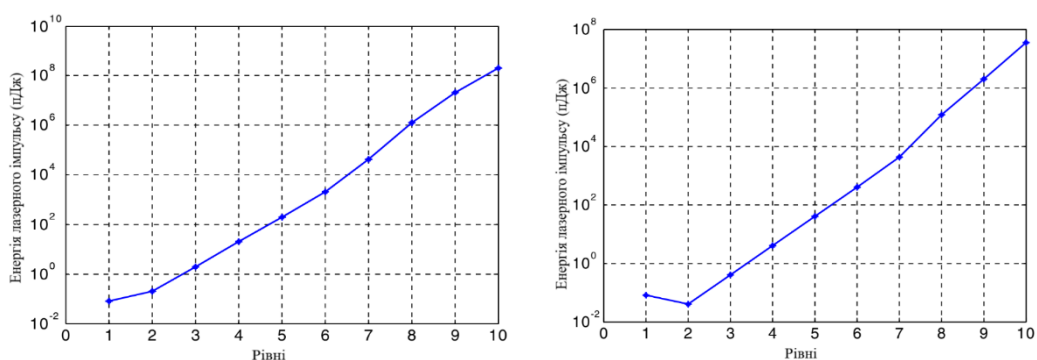


Рисунок 3.5 – Енергія вихідного лазерного імпульсу на різних рівнях: частоти повторення 5 кГц (зліва) та 50 кГц (зправа).

3.1.2 Механіка сканування

Скануючий блок складається з двовісного моторного сканера та п'єзоелектричного автоматичного автомата (FSM). Серводвигуни були використується для сканування по обох осях, як показано на рисунку 3.6. Як привід двигуна обрано цифровий контролер SJM320F2812. На основі сигналу, отриманого QAPD, можна розрахувати положення цілі. Після обробки DSP розраховується керуючий сигнал двовісного двигуна. Потім керуючий сигнал надсилається до приводу двигуна для зміни його стану. Високоточні фотоелектричні кодери положення вала використовуються для зворотного зв'язку щодо кутового положення двигунів до контролера команд. Точність кутового положення фотоелектричних кодерів вала може досягати $0,006^\circ$. Допоміжна скануюча частина являє собою двовимірний FSM, який використовується для швидкого сканування в малому діапазоні кутів. Його точність кутового положення може досягати $0,05$ мрад [21].

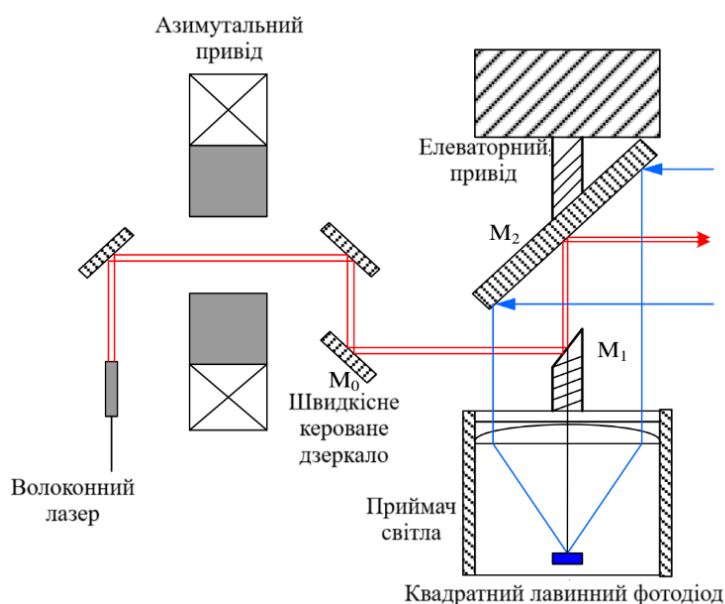


Рисунок 3.6 – Механіка сканування

3.1.3 Оптиелектронний приймач

Приймальна оптична система являє собою приймальний телескоп, як показано на рисунку 3.6, а кут огляду приймача становить $2,5^\circ$. Ефективність приймальної апертури становить 50 мм. Як позиційно-чутливий детектор використовується QAPD. Схеми детектування, показані на рисунку 3.7, складаються переважно з багатоступеневої схеми підсилювача та схеми утримання піку. Чотири однакові схеми детектування підключені до кожного пікселя QAPD, а схеми утримання піку підключені за кожним підсилювачем [23]. Амплітуда сигналу, що використовується для розрахунку кутового положення та для зміни енергії лазерного імпульсу, передається в сигнальний процесор. Сигнал після формування використовується як сигнал зупинки для схеми визначення часу (ВМТ).

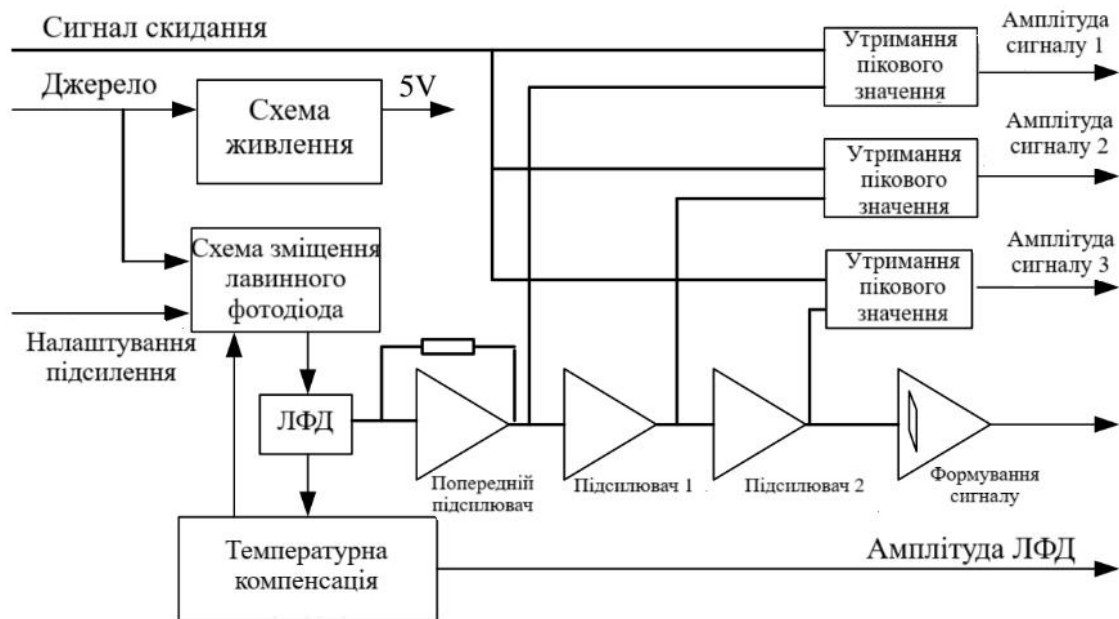


Рисунок 3.7 – Підсилювач та схема утримання піку для одного пікселя квадратного лавинного фотодетектора

3.1.4 Процесор сигналів та контролер команд

Як показано на рисунку 3.8, цей модуль в основному відповідає за обробку сигналів, керування всією системою, збір та передачу інформації. Процесор сигналів використовується для вимірювання кутового положення та відстані. Відстань можна отримати за допомогою TDC, що досягається за допомогою мікросхеми програмованої польовою логічною матриці (FPGA) та мікросхеми TDC-GPX. Відстань до цілі можна визначити шляхом вимірювання часу обертання лазерного імпульсу, а точність вимірювання часу TDC становить 81 пс. Кутове положення розраховується за амплітудою сигналу в різних квадрантах QAPD [22]. Для керування всією системою використовується мікросхема DSP. Вона збирає інформацію з волоконного лазера, процесора сигналів, фотоелектричних енкодерів положення вала двигунів та датчика температури. Цифровий процес обробки сигналів (DSP) встановлює параметри струму лазерного діода накачування (LD) волоконного лазера для зміни енергії вихідного лазерного імпульсу відповідно до амплітуди сигналу QAPD. Якщо сигнал досягає насичення, струм LD накачування зменшується. Відповідно до інформації від фотоелектричних енкодерів положення вала та модуля обробки сигналів, кутове положення можна розрахувати точно. Одночасно двовісний моторний сканер та п'єзоелектричний автоматичний модуль наведення (FSM) керуються для наводчись на ціль шляхом аналізу кута лідарно-цільової лінії в полі зору (FOV).

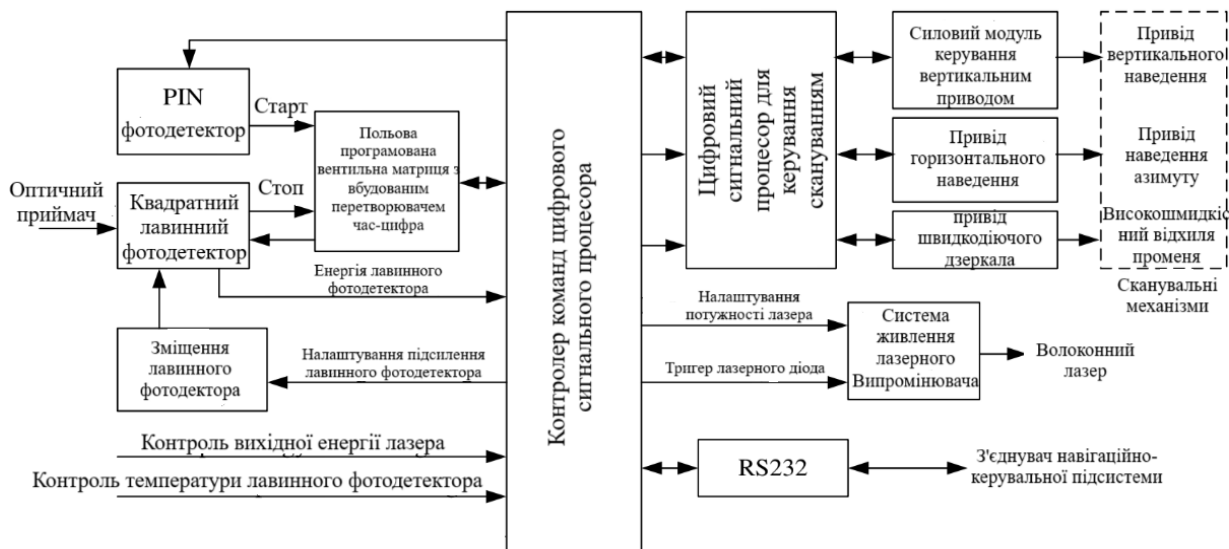


Рисунок 3.8 – Схема архітектури системи

3.2 Результати експерименту

У цьому розділі обговорюються основні функції та характеристики лідара.

Розглядаються початковий час збору даних, максимальна робоча дальність та точність кутового та дальнього вимірювання. Реалізовано три тестові сценарії, включаючи симуляційну платформу. Початковий час збору даних та максимальна дальність виявлення. Система лідара встановлена на високоточній двовимірній обертовій платформі.

Кутова точність обертової платформи в горизонтальному напрямку становить $0,0045^\circ$, а у вертикальному напрямку – $0,0049^\circ$. Швидкість обертання можна встановити аналогічною відносною швидкості між двома космічними апаратами. У цьому експерименті ціль, що об'єднується, розташована в будівлі в центрі міста на відстані приблизно 1 км. Коли платформа обертається, лідарна система може автоматично шукати та відстежувати кооперативну ціль. Час збору даних становить менше 90 с при відносному куті прямої видимості $2,8$ град/с. На тій самій експериментальній платформі перевіряється максимальна дальність. Кооперативна ціль все ще розташовується на відстані 1 км. Відповідно до

фактичної енергії лазера та атмосферної видимості D , максимальну робочу дальність можна розрахувати, змінивши енергію лазера передавача, якщо освітлювальна лазерна пляма достатньо велика порівняно з кооперативною ціллю на тестовій ділянці [23]. Різниця між тестовою дальністю та максимальною робочою полягає лише в різній енергії переданого випромінювання та атмосферному ослабленні. Для оцінки коефіцієнта атмосферного ослаблення в будівлі під час експериментів встановлено вимірювач видимості. Коефіцієнт атмосферного ослаблення σ можна розрахувати відповідно до видимості D наступним чином:

$$\sigma = \frac{3,91}{D} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-q}. \quad (3.1)$$

Отже, максимальну дальність можна описати так:

$$R_{max} = \left(\frac{E_{trans}}{E_{exp}} \times \frac{1}{\exp(-2\sigma R_{test})} \right)^{\frac{1}{4}} \times R_{test}, \quad (3.2)$$

де E_{trans} та E_{exp} – максимальна енергія лазерного імпульсу та енергія на експериментальній відстані, відповідно [23];

R_{test} – це дальність, виміряна в експерименті.

Енергія лазера, що пройшла, послаблюється крок за кроком, і лідарна система повинна продовжувати відстежувати ціль з достатньою точністю. Під час експерименту, атмосферна видимість D становить 4 км. Коли енергія лазера слабшає до 400 пДж, лідарна система все ще відстежує ціль. Згідно з конструкцією системи, на максимальній дальності буде використовуватися енергія лазера 34 мкДж. Отже, максимальну дальність можна розрахувати наступним чином:

$$R_{max} = \left(\frac{34\mu J}{400\mu J} \times \frac{1}{\exp(-2\sigma R_{test})} \right) \times R_{test}, \quad (3.3)$$

де R_{test} становить близько 1 км; отже, максимальна робоча дальність становить близько 24,3 км.

Результат добре узгоджується з даними, які передбачила система. Під час експерименту атмосферна видимість становила близько 20 км. Лідарна система все ще добре працювала для пошуку та відстеження цілі. Точність дальності перевіряється на різних відстанях. Лідарна система все ще встановлена на двовимірній обертовій платформі, як показано на рисунку 3.9. Ціль розташована на відстані 20,8 м. Лідарна система продовжує відстежувати ціль, і записує 50 вимірювань. Таким чином, точність дальності можна розрахувати таким чином:

$$3\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{50} [d_i - d_s]^2}{49}} \times 3, \quad (3.4)$$

де d_s – практична відстань;

d_i – виміряна відстань.

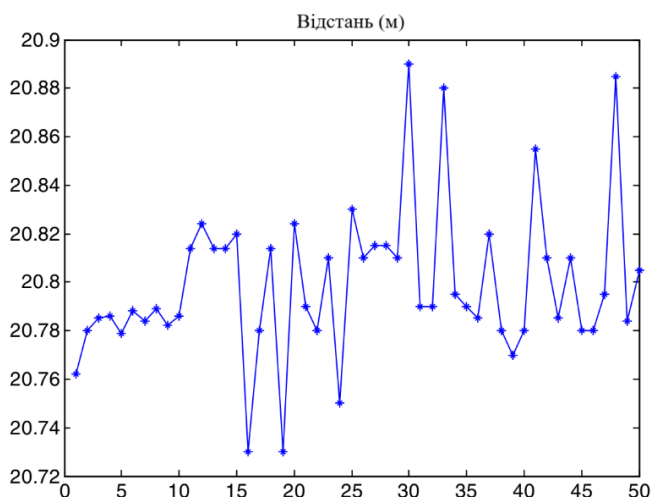


Рисунок 3.9 – Випробування дальності на відстані 20,8 м

Вимірювання показано на рисунку 3.9, а точність вимірювання відстані (3σ) близько 20,8 м становить 0,096 м. Тут 3σ вважається точністю вимірювання системи, і ймовірність того, що фактична точність вимірювання перевищить її, дуже мала. Це забезпечує надійність системи. Також оцінюється точність

вимірювання відстані на середніх та великих відстанях. На рисунку 3.10 показано виміряні відстані на 4252,7 м та 18,95 км. Точність вимірювання відстані (3σ) становить 1,24 та 1,56 м на відстанях 4252,7 м та 18,95 км відповідно [24].

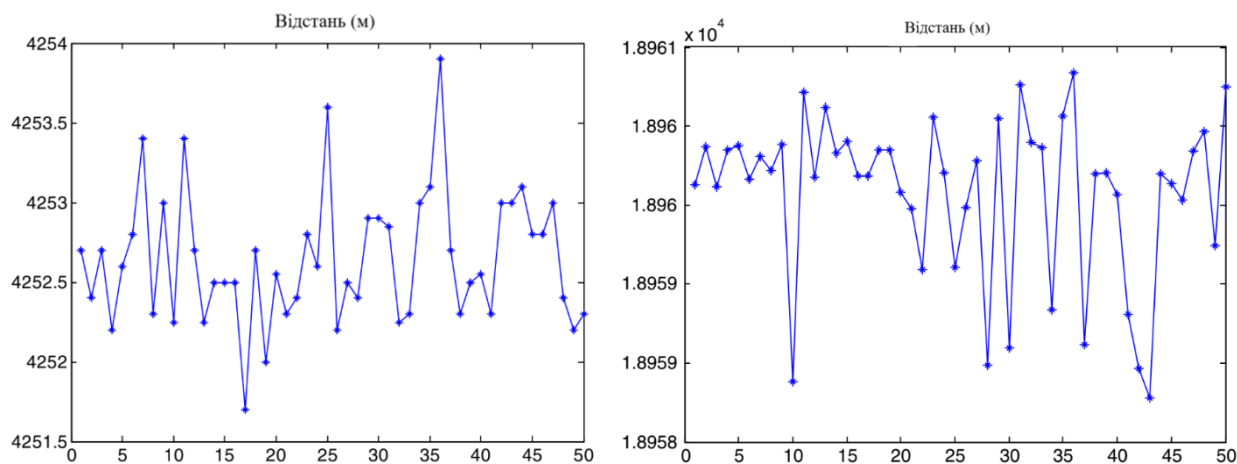


Рисунок 3.10 – Випробування дальності на висоті 4252,7 м (ліворуч та 18,95 км (праворуч)

Подібно до сцени тестування точності вимірювання дальності, демонструється кутова точність. Лідарна система закріплена на двовимірній обертовій платформі. Обертюва платформа повертається на α_s у горизонтальному напрямку, і система надає кутові дані α_a та α_b у початковій та кінцевій точках відповідно. Це дає 50 безперервних кутових даних. Взявши середнє значення кута у початковій точці та оцінивши його точність, формула оцінки така:

$$3\sigma_{\alpha} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{50} [|\alpha_{bi} - \bar{\alpha}_a| - \alpha_s]^2}{49}} \times 3. \quad (3.5)$$

Потім обертова платформа повертається на β_s у напрямку тангажу, і система видає кутові дані β_a та β_b у початковій та кінцевій точках відповідно. Це дає 50 безперервних кутових даних. Взявши середнє значення кутових даних у початковій точці та оцінивши їх точність, формула оцінки така:

$$3\sigma_{\beta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{50} [|\beta_{bi} - \bar{\beta}_{\alpha}| - \beta]^2}{49}} \times 3. \quad (3.6)$$

Коли ціль знаходиться на відстані 20,8 м, $\alpha_s 5,719^\circ$, $\alpha_a 0,906^\circ$, $\beta_s 2,192^\circ$ та $\beta_a 0,853^\circ$. Згідно з формулами (3.5) та (3.6), кутова точність у горизонтальному напрямку становить $0,0093^\circ$, тоді як кутова точність у вертикальному напрямку становить $0,012^\circ$. Коли ціль знаходиться на відстані 4,2 км, $\alpha_s 5,719^\circ$, $\alpha_a 5,606^\circ$, $\beta_s 2,192^\circ$ та $\beta_a -0,754^\circ$. Безперервні кутові дані показано на рис. 14. Згідно з формулами (5) та (6), кутова точність у горизонтальному напрямку становить $0,016^\circ$, тоді як кутова точність у вертикальному напрямку становить $0,016^\circ$ [25].

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи:

Проведено огляд сучасних лазерних систем просторового сканування, зокрема систем, що реалізують сканування в лінійній та панорамній геометрії. Показано, що LIDAR-системи відіграють ключову роль у завданнях цифрової картографії, розвідки, розмінування та автономної навігації.

Розглянуто принципи роботи платформи LAMDRIS як прикладу інтегрованої лазерної системи, що об'єднує LIDAR-модуль, навігаційні засоби, блоки штучного інтелекту та систему управління автономною платформою. Проведено аналіз її структури, принципів дії та функціонального призначення.

Досліджено фізичні явища, що лежать в основі генерації та поширення лазерного випромінювання, зокрема процеси поглинання, спонтанного й вимушеного випромінювання, явища когерентності та інтерференції. Визначено роль довжини когерентності та добротності резонатора у забезпеченні просторової роздільної здатності системи.

Показано, як формуються тривимірні зображення в LIDAR-системах, включно з математичними залежностями для визначення координат точок у просторі на основі вимірювань часу польоту лазерного імпульсу та кутових положень сканера.

Запропоновано структурну модель лазерної системи просторового сканування, що включає імпульсний волоконний лазер на довжині хвилі 1030 нм, систему гальванометричних дзеркал, квадрантний лавинний фотодіод (QAPD), сигнальний процесор на базі DSP та систему стабілізації енергії випромінювання.

Виконано аналіз експериментальних характеристик моделі системи, зокрема точності вимірювання відстані, максимальної дальності виявлення та похибок позиціонування. Показано, що система здатна стабільно працювати на відстанях до 24 км при збереженні точності визначення координат у межах до 1,5 м.

Оцінено застосування алгоритмів глибинного машинного навчання для автоматичного розпізнавання об'єктів у хмарі точок. Продемонстровано

ефективність використання архітектур типу PointNet для виявлення техногенних аномалій у даних лазерного сканування.

Таким чином, у роботі розроблено концепцію лазерної системи просторового сканування на основі волоконного імпульсного лазера з гальванометричним скануванням, здатної до автономної роботи в складі мобільних платформ. Об'єднання фізичних принципів, оптоелектронної реалізації та інтелектуальної обробки даних забезпечує перспективність подальшого впровадження таких систем у сфері дистанційного зондування, безпеки, топографії та роботизованої розвідки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications
URL: <https://coast.noaa.gov/data/digitalcoast/pdf/lidar-101.pdf> (дата звернення 19.05.2025).
2. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies URL: <https://academic.oup.com/bioscience/article-abstract/52/1/19/291259?redirectedFrom=fulltext&login=false> (дата звернення 19.05.2025).
3. Lidar (Wikipedia) URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar> (дата звернення 19.05.2025).
4. HDL-64E S2 & S3 Data Sheet (Velodyne) URL: <https://hypertech.co.il/wp-content/uploads/2015/12/HDL-64E-Data-Sheet.pdf> (дата звернення 21.05.2025).
5. Integrating Drone-Based LiDAR and Multispectral Data for Tree Monitoring URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/12/744> (дата звернення 21.05.2025).
6. Siegman, A. E. Lasers. University Science Books, 1986. URL: <https://archive.org/details/lasers0000sieg> (дата звернення 11.06.2025)
7. В Е А Saleh, М С Teich, Fundamentals of Photonics, Wiley, 2007 (3-є видання 2019) URL: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/7544/01/L-G-0000754401-0002366953.pdf> (дата звернення 12.06.2025).
8. Velodyne HDL-64E Lidar – Technical Data Sheet URL: <https://hypertech.co.il/wp-content/uploads/2015/12/HDL-64E-Data-Sheet.pdf> (дата звернення 22.06.2025).
9. M Velas et al., “A Review of the State of the Art in Lidar-based SLAM and Localization for Autonomous Vehicles”, Robotics and Autonomous Systems, 2018
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921889016302585?via%3Dihub> (дата звернення 01.07.2025).

10. Optica Publishing Group. Fiber laser-based scanning lidar for space rendezvous and docking URL: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-54-9-2470> (дата звернення 02.07.2025).
11. Allegro MicroSystems — Lidar Effective Range URL: <https://www.allegromicro.com/en/insights-and-innovations/technical-documents/p0177-lidar-effective-range> (дата звернення 02.07.2025).
12. NIST (Чжан та ін., 2009) URL: <https://www.rpmclasers.com/product/jasper-x0-high-power-femtosecond-fiber-laser/> (дата звернення 03.07.2025).
13. MacNekhin, Yu P., Yu S. Kurskoy, and A. S. Gnatenko. "Physical and mathematical foundations of measurements in nonlinear dynamic systems." Telecommunications and Radio Engineering 77.18 (2018).
14. Гнатенко, О. С., and Ю. В. Жданова. "Моделювання лазерних прецизійних інформаційно-вимірювальних пристроїв." (2019).
15. Kurskoy, Yu S., O. S. Gnatenko, and O. V. Afanasieva. "Precision Synchronization of Chaotic Optical Systems." (2021).
16. Бітюков, А. Ю., and О. С. Гнатенко. "Розрахунок та моделювання оптики приймальних вузлів лазерних систем." (2019).
17. Kurskoy, Y., Gnatenko, O., Sherstyuk, D., Zarytskyi, V., Chernovolyk, G., Nussupbekova, G., ... & Muslimov, K. (2024, December). Precision control model for chaotic laser generation in optical communication and laser measurement systems. In Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024 (Vol. 13400, pp. 208-215). SPIE.
18. Гнатенко, О. С. "Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 3. Фемтосекундні лазери для інформаційно-вимірювальних технологій." (2023).
19. Gnatenko, Oleksandr S., et al. "Fiber-optic system for control of the orientation of objects in space." Optical Fibers and Their Applications 2023. Vol. 12985. SPIE, 2023.
20. Kurskoy, Yu S., O. S. Gnatenko, and O. V. Afanasieva. "Application of Supercontinuum in Optical Gyroscopy." (2023).

21. Machekhin, Yu P., S. S. Herasymov, and O. S. Hnatenko. "Design and optimal parameters of a small-sized diode-pumped Nd: YAG laser setup." (2023).
22. Мачехін, Ю. П., Гнатенко, О. С., Курський, Ю. С., Семенець, В. В., & Неофітний, М. В. (2019). Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 1. Лазерна інформаційновиміррювальна техніка для задач військового призначення.
23. Hnatenko, O. S., Machekhin, Y. P., Neofitnyi, M. V., & Gulak, S. V. (2019). Design and study of a laser system for detecting optical devices.
24. Obozna, V. P., and O. S. Hnatenko. "Formation of Laser Radiation Pulses for Encoding in Formation." (2018).
25. Obozna, V. P., & Hnatenko, O. S. (2019). The impact of laser radiation on nanoparticles, which using in medical.