

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Підвищення точності виявлення і супроводження БПЛА
з використанням LIDAR-сенсора

Виконав: студент 6 курсу, групи РАм-61
спеціальності 172 Електронні комунікації та
радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

Чикета В.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Хвостівська Л.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«26» листопада 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Чикеті Василю Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення точності виявлення і супроводження БПЛА з використанням LiDAR-сенсора

Керівник роботи Дунець Василь Любомирович, к.т.н., доцент, завідувач кафедри РТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «26» листопада 2025 року № 4/7-1038

2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації, технічна документація LiDAR-сенсорів та параметри типових траєкторій польоту БПЛА для моделювання процесів виявлення і супроводження

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Розділ 1. Аналітична частина

Розділ 2. Основна частина

Розділ 3. Науково-дослідна частина

Розділ 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Загальні висновки

Перелік посилань

Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів):

1. Титульний слайд. 2. Актуальність теми. 3. Мета, задачі, об'єкт, предмет, методи дослідження.
4. Огляд відомих рішень. 5. Структура системи 3D-зондування. 6. Алгоритм обробки LiDAR-
даних в середовищі ROS. 7. Умови виявлення БПЛА. Геометрія сканування. 8. Адаптивні
режими сканування поворотно-нахильної платформи. 9. Супроводження траєкторії БПЛА.
10. Щільність виявлення БПЛА у часі. 11. Порівняння типів руху систем сканування LiDAR.
12. Висновки. 13. Дякую за увагу!

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., зав. кафедри МТ Окіпний І.Б.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. кафедри ОХ Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання 26 листопада 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	26.11.2025	Виконано
2.	Підбір джерел по темі кваліфікаційної роботи	29.11.2025 – 01.12.2025	Виконано
3.	Переклад та опрацювання джерел по темі кваліфікаційної роботи	01.12.2025 – 03.12.2025	Виконано
4.	Виконання дослідження по темі кваліфікаційної роботи	03.12.2025 – 05.12.2025	Виконано
5.	Оформлення розділу «Аналітична частина»	05.12.2025 – 07.12.2025	Виконано
6.	Оформлення розділу «Основна частина»	07.12.2025 – 09.12.2025	Виконано
7.	Оформлення розділу «Науково-дослідна частина»	09.12.2025 – 11.12.2025	Виконано
8.	Оформлення розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	11.12.2025	Виконано
9.	Підготовка графічного матеріалу	11.12.2025 – 12.12.2025	Виконано
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	11.12.2025 – 12.12.2025	Виконано
11.	Нормоконтроль	12.12.2025	Виконано
12.	Перевірка на плагіат	12.12.2025	Виконано
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	12.12.2025	Виконано
14.	Захист кваліфікаційної роботи	26.12.2025	

Студент

(підпис)

Чикета В.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Дунець В.Л.

(прізвище та ініціали)

Підвищення точності виявлення і супроводження БПЛА з використанням LIDAR-сенсора // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Магістр» // Чикета Василь Олегович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, кафедра радіотехнічних систем, група РАМ-61 // Тернопіль, 2025 // С. 87, рис. – 46, табл. – 1, додат. – 1, бібліогр. – 38.

Ключові слова: БПЛА, LIDAR-СЕНСОР, ВИЯВЛЕННЯ БПЛА, СУПРОВОДЖЕННЯ БПЛА, PTU, РОЗШИРЕНИЙ ФІЛЬТР КАЛМАНА, ПРОСТОРОВА ФІЛЬТРАЦІЯ, КЛАСТЕРИЗАЦІЯ ХМАРИ ТОЧОК.

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню точності виявлення і супроводження БПЛА з використанням LiDAR-сенсора.

У першому розділі проаналізовано сучасні підходи до виявлення і супроводження БПЛА (акустичні, радіолокаційні та LiDAR-технології) та обґрунтовано вибір LiDAR-сенсора як засобу для підвищення ефективності цих процесів.

У другому розділі досліджено методику побудови системи виявлення і супроводження БПЛА на основі LiDAR-сенсора та поворотно-нахильної платформи (PTU). Розроблено програмно-апаратну архітектуру в середовищі ROS, алгоритми просторової обробки даних (фільтрація і кластеризація хмари точок) та адаптивного керування скануванням LiDAR.

У третьому розділі розроблено та експериментально перевірено прототип такої системи. Проведено імітаційне моделювання та натурні випробування з квадрокоптером і LiDAR-сенсором, за результатами яких оцінено ймовірність виявлення БПЛА та точність його супроводження, підтверджено ефективність запропонованих рішень.

У четвертому розділі проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі фактори під час експлуатації системи виявлення і супроводження БПЛА на основі LiDAR-сенсора, обґрунтовано комплекс організаційних і технічних заходів з охорони праці, а також розроблено заходи та алгоритми дій персоналу щодо забезпечення безпеки в умовах можливих надзвичайних ситуацій.

ANNOTATION

Improving the accuracy of UAV detection and tracking using a LIDAR sensor // Qualification work of the educational level «Master» // Chyketa Vasyl // Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Radio Engineering Systems Department, group RAm-61 // Ternopil, 2025 // P. 87, fig. – 46, tabl. – 1, annexes. – 1, references – 38.

Keywords: UAV, LIDAR SENSOR, UAV DETECTION, UAV TRACKING, PTU, EXTENDED KALMAN FILTER, SPATIAL FILTERING, POINT CLOUD CLUSTERING.

The qualification work is devoted to improving the accuracy of UAV detection and tracking through the use of a LiDAR sensor.

The first chapter analyzes modern approaches to UAV detection and tracking (acoustic, radar, and LiDAR-based technologies) and substantiates the choice of the LiDAR sensor as a means to increase the effectiveness of these processes.

The second chapter investigates the methodology for building a UAV detection and tracking system based on a LiDAR sensor and a pan-tilt platform (PTU). The hardware-software architecture in ROS is developed, as well as algorithms for spatial data processing (point cloud filtering and clustering) and adaptive LiDAR scanning control.

The third chapter presents the development and experimental testing of a prototype of such a system. Simulation and field experiments with a quadcopter and LiDAR were conducted, the target detection probability and tracking accuracy were evaluated, and the effectiveness of the proposed solutions was confirmed.

The fourth chapter analyzes hazardous and harmful factors arising during the operation of the LiDAR-based UAV detection and tracking system, substantiates a set of organizational and technical occupational safety measures, and develops measures and personnel response algorithms to ensure safety in potential emergency situations.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ

ArduPilot – Система керування безпілотними апаратами з відкритим кодом.

C++ – Універсальна мова програмування високого рівня з підтримкою декількох парадигм програмування.

CSV (англ. Comma-Separated Values) – Файловий формат, котрий є відмежовувальним форматом для представлення табличних даних, у якому поля відокремлюються символом коми та переходу на новий рядок.

CW (англ. Continuous Wave) – Неперервна хвиля або неперервний сигнал.

DEM (англ. Digital Elevation Model) – Цифрова модель рельєфу/місцевості.

EKF (англ. Extended Kalman Filter) – Розширений фільтр Калмана.

GMM (англ. Gaussian Mixture Model) – Модель суміші гаусових розподілів.

GNSS (англ. Global Navigation Satellite System) – Глобальна навігаційна супутникова система.

GPS (англ. Global Positioning System) – Система глобального позиціонування.

INS (англ. Inertial Navigation System) – Інерціальна навігаційна система.

Ku-діапазон – Діапазон частот сантиметрових хвиль.

LiDAR (англ. Light Identification, Detection and Ranging) – Технологія отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища відбиття світла і його розсіювання в прозорих і напівпрозорих середовищах.

MATLAB (англ. Matrix Laboratory) – Пакет прикладних програм для чисельного аналізу, а також мова програмування.

MFCC (англ. Mel-Frequency Cepstral Coefficients) – Коефіцієнти мел-частотного кепстру.

PTU (англ. Pan-Tilt Unit) – Поворотно-нахильна платформа.

RCS (англ. Radar Cross-Section) – Ефективна площа розсіювання.

ROS (англ. Robot Operating System) – Вільна операційна система для програмування роботів.

SNR (англ. Signal-to-Noise Ratio) – Співвідношення сигнал/шум.

SVM (англ. Support Vector Machine) – Метод опорних векторів.

VLP (англ. Visible Light Positioning) – Система позиціонування на основі випромінювання у видимому діапазоні.

БПЛА – Безпілотний літальний апарат.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	12
1.1. Аналіз існуючих підходів до виявлення та супроводження БПЛА.....	12
1.1.1. Виявлення БПЛА за акустичними сигналами.....	12
1.1.2. Виявлення БПЛА з використанням CW-радара та GMM.....	12
1.1.3. Виявлення БПЛА з використанням LiDAR-сенсорів.....	12
1.1.4. Твердотільний LiDAR для супроводження БПЛА в умовах недоступності сигналів GNSS.....	13
1.1.5. Виявлення БПЛА з використанням радіолокаційної станції поля бою Ku-діапазону	13
1.1.6. Технологія пасивної радіолокації для виявлення БПЛА	14
1.2. LiDAR-сенсори в системах виявлення БПЛА.....	14
1.2.1. LiDAR-сенсор	14
1.2.2. Переваги LiDAR-сенсора	15
1.2.3. Сфери застосування LiDAR-систем.....	17
1.2.4. Модель VLP-16 компанії Velodyne	19
1.2.5. Застосування LiDAR-сенсора в системі сенсорного контролю	21
1.2.6. Режими відбиття лазерних імпульсів.....	23
1.3. Процеси виявлення та обробки даних	25
1.3.1. Виділення та опрацювання записаних даних.....	27
1.3.2. Вихідні дані обчислювальної частини.....	28
1.4. Проміжки між послідовними вимірюваннями.....	31
1.5. Висновки до розділу 1	35
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	36
2.1. Методика розробки системи	36
2.1.1. Вузол «Фільтр».....	37
2.1.2. Вузол «Контролер»	38
2.1.3. Вузол «Розширений фільтр Калмана»	39

2.2.	Експериментальна установка та конфігурація.....	42
2.3.	Висновок до другого розділу	46
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....		47
3.1.	Валідація методів та системи.....	47
3.1.1.	І етап. Моделювання траєкторії БПЛА в MATLAB.....	48
3.1.2.	II етап. Рух за прямолінійними траєкторіями	52
3.1.3.	III етап. Рух за квадратними траєкторіями.....	55
3.2.	Результати експериментів	57
3.2.1.	Початковий тест ручного керування БПЛА.....	57
3.2.2.	Моделювання автоматизованого керування БПЛА з використанням розширеного фільтра Калмана.....	59
3.2.3.	Порівняння 3D-оціненої траєкторії з реальною траєкторією.....	61
3.2.4.	Порівняння оціненої та реальної траєкторії руху БПЛА за координатах X, Y, Z.....	64
3.2.5.	Коваріації оцінки координати x.....	66
3.2.6.	Щільність виявлення у часі.....	68
3.2.7.	Аналітичне порівняння патернів руху системи сканування LiDAR	70
3.3.	Висновок до третього розділу	71
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ		73
4.1.	Організація охорони праці під час експлуатації апаратно-програмного комплексу на основі LiDAR-сенсора	73
4.2.	Забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях при експлуатації системи виявлення і супроводження БПЛА.....	77
4.3.	Висновок до четвертого розділу.....	81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ		82
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....		83
ДОДАТКИ		

ВСТУП

Актуальність теми. Впродовж останніх років безпілотні літальні апарати (БПЛА) активно впроваджуються в цивільні та військові застосування, трансформуючись із суто спеціалізованих військових платформ у масово доступні технічні засоби. Невеликі габарити, мобільність, простота експлуатації, а також постійне розширення функціональних можливостей (зростання тривалості польоту, поліпшення якості відеозйомки, стабілізації тощо) сприяли широкому поширенню БПЛА серед користувачів різних категорій. Разом із тим зростання доступності супроводжується підвищенням рівня загроз: фіксується використання БПЛА для несанкціонованого відеоспостереження, порушення приватності, проведення розвідки, підготовки диверсійних і терористичних дій. Низька акустична й візуальна помітність малогабаритних БПЛА, а також можливість дистанційного керування суттєво ускладнюють їх оперативне виявлення та ідентифікацію.

Зазначені обставини формують потребу у створенні високоефективних технічних засобів виявлення та супроводження БПЛА, здатних функціонувати в реальному часі та за складних умов навколишнього середовища. Перспективним напрямом є використання LiDAR-сенсорів, що забезпечують формування тривимірних хмар точок із високою просторовою роздільною здатністю, що дає змогу точно оцінювати положення та траєкторію руху БПЛА. Інтеграція LiDAR із роботизованими платформами, методами машинного навчання та технологіями злиття даних від різнорідних сенсорів створює основу для побудови адаптивних систем протидії загрозам, пов'язаним із використанням БПЛА.

Мета і задачі дослідження. Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» є підвищення точності процесів виявлення та супроводження БПЛА за допомогою використання LiDAR-сенсора.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

- Проаналізувати існуючі методи та засоби виявлення і супроводження БПЛА та виявити їхні недоліки й переваги, зокрема оцінити потенціал використання LiDAR-технологій.
- Розробити методику та архітектуру системи виявлення і супроводження БПЛА на базі LiDAR-сенсора і PTU.
- Створити алгоритми обробки даних LiDAR (просторової фільтрації та кластеризації хмари точок) і траєкторного супроводження БПЛА з використанням розширеного фільтра Калмана.
- Експериментально перевірити працездатність розробленої системи шляхом моделювання та натурних випробувань.
- Проаналізувати отримані результати щодо ймовірності виявлення БПЛА та точності його супроводження.

Об’єкт дослідження. Основним об’єктом дослідження є процес виявлення і супроводження БПЛА у реальному часі за різних умов середовища.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є методи та алгоритми підвищення точності виявлення і супроводження БПЛА на основі використання LiDAR-сенсора і поворотно-нахильної платформи.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі використано методи аналізу літературних джерел і сучасних технологій, математичного моделювання процесів руху БПЛА (в середовищі MATLAB), методи обробки тривимірних даних (просторова фільтрація та кластеризація точок), алгоритми теорії керування та оцінювання стану об’єктів (розширений фільтр Калмана), а також експериментальні методи – натурні випробування із застосуванням LiDAR-сенсора, встановленого на поворотно-нахильній платформі, та квадрокоптера як повітряної цілі (реалізація комплексу в середовищі ROS).

Практичне значення одержаних результатів. Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що розроблені в роботі підходи та алгоритми можуть бути використані при створенні вискоєфективних систем протидії БПЛА. Запропонована LiDAR-система виявлення і супроводження

БПЛА може бути інтегрована в стаціонарні або мобільні платформи для охорони периметру важливих об'єктів, забезпечуючи надійне виявлення малогабаритних БПЛА в реальному часі. Використання адаптивного сканування LiDAR-сенсора підвищує імовірність своєчасного виявлення БПЛА та точність визначення його траєкторії, що покращує ефективність захисних заходів у сфері безпеки і оборони.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна роботи полягає в розробці нових методів підвищення точності виявлення і супроводження БПЛА шляхом інтеграції LiDAR-сенсора з RTU та застосування адаптивних алгоритмів керування скануванням. Вперше запропоновано використання спеціальних режимів руху платформи («Sweeping», «Swing», «Slow-Down», «Stop»), які динамічно змінюють просторове положення LiDAR-сенсора і дозволяють збільшити кількість реєстрацій БПЛА. Це підвищує ймовірність виявлення малогабаритного БПЛА та точність оцінювання його траєкторії в режимі реального часу. Також новим є комплексне поєднання алгоритмів просторової фільтрації та кластеризації хмари точок з розширеним фільтром Калмана для високоточного відстеження рухомих повітряних об'єктів. Результати дослідження розширюють наукові уявлення про побудову адаптивних LiDAR-систем спостереження та можуть слугувати основою для подальшого розвитку технологій протидії БПЛА.

Публікації. Викладені в роботі результати доповідалися та обговорювалися на XIV Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 11-12 грудня 2025 року).

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Аналіз існуючих підходів до виявлення та супроводження БПЛА

1.1.1. Виявлення БПЛА за акустичними сигналами

Одним із дієвих підходів протидії БПЛА є їх виявлення й ідентифікація за акустичними характеристиками. Для цього аналізуються інформативні параметри звукового сигналу, зокрема короткочасна енергія, часовий центроїд, частота перетину нуля та MFCC. На основі сукупності цих ознак формується простір ознак, у якому за допомогою однокласової SVM виконується відокремлення акустичного підпису БПЛА від фонового шуму. Застосування такого підходу дає змогу зменшити кількість хибних спрацьовувань та підвищити загальну достовірність виявлення БПЛА [15].

1.1.2. Виявлення БПЛА з використанням CW-радару та GMM

Іншим напрямом є використання радару безперервної хвилі (CW-радару), який постійно випромінює сигнал та реєструє його відбиття від нерухомих і рухомих об'єктів. Для відокремлення БПЛА від фонового середовища застосовується GMM, що описує статистичні властивості фону та забезпечує придушення нерелевантних відбиттів. Виявлення БПЛА здійснюється шляхом аналізу відхилень пікселів радіолокаційних даних від моделі фону, що підвищує чутливість системи до малорозмірних повітряних цілей [11].

1.1.3. Виявлення БПЛА з використанням LiDAR-сенсорів

LiDAR-сенсори посідають важливе місце серед засобів виявлення БПЛА завдяки здатності формувати високоточні тривимірні просторові дані про об'єкти в зоні спостереження. БПЛА з підвищеною відбивною здатністю та відносно гладкою поверхнею генерують виразні відгуки в хмарі точок, що полегшує їх виділення на тлі оточення. Численні дослідження [1, 16, 4]

підтверджують ефективність LiDAR для задач виявлення й відстеження БПЛА в режимі реального часу за широкого діапазону умов навколишнього середовища. Додаткове поєднання LiDAR-даних з інформацією від тепловізійних камер та акустичних сенсорів підвищує надійність і завадостійкість системи, що робить LiDAR перспективним компонентом багатосенсорних комплексів супроводу БПЛА.

1.1.4. Твердотільний LiDAR для супроводження БПЛА в умовах недоступності сигналів GNSS

Твердотільні LiDAR-системи розглядаються як один із ключових засобів супроводу БПЛА за умов відсутності або суттєвого спотворення сигналів GNSS. Відсутність рухомих механічних компонентів підвищує надійність таких сенсорів і робить їх більш придатними для роботи з швидкорухомими повітряними цілями. Керування часом інтеграції кадру та використання двочастотного режиму сканування дають змогу зменшити ефект розмиття та підвищити точність оцінювання траєкторії руху об'єкта [1]. Для підвищення якості супроводу в складних сценаріях застосовуються методи об'єднання даних, зокрема техніка оберненого перетину коваріацій (ICI) та різні модифікації фільтра Калмана, що забезпечують узгоджену інтеграцію інформації з кількох джерел.

1.1.5. Виявлення БПЛА з використанням радіолокаційної станції поля бою Ku-діапазону

Радіолокаційні станції Ku-діапазону, що функціонують у смузі частот близько 12-18 ГГц, демонструють високу ефективність під час виявлення БПЛА на малих і середніх дистанціях. Ймовірність виявлення в таких системах значною мірою визначається радіолокаційною RCS цілі та SNR. Показано, що БПЛА з більшою геометричною площею та, відповідно, вищою RCS реєструються з більшою надійністю, що робить використання Ku-діапазону доцільним для організації моніторингу обмежених зон та критично важливих об'єктів.

1.1.6. Технологія пасивної радіолокації для виявлення БПЛА

Пасивні радарні системи реалізують альтернативний підхід до виявлення БПЛА, що ґрунтується на аналізі змін у наявних електромагнітних полях, сформованих сторонніми джерелами, зокрема мережами Wi-Fi, стільниковим зв'язком або супутниковими системами. У цьому випадку радіолокаційний комплекс не генерує власного випромінювання, а реєструє та обробляє відбиті чи розсіяні компоненти зовнішніх сигналів. Такий підхід є малопомітним, відносно економним та придатним для виявлення малогабаритних БПЛА у густозабудованих і щільно населених районах. Використання навколишніх сигналів як «опромінювачів» забезпечує масштабованість і зниження вартості побудови пасивних радарних систем для задач тривалого моніторингу повітряного простору.

1.2. LiDAR-сенсори в системах виявлення БПЛА

1.2.1. LiDAR-сенсор

LiDAR належить до класу сучасних активних оптико-електронних систем дистанційного зондування, призначених для тривимірного відтворення простору та визначення відстані до об'єктів у навколишньому середовищі. Принцип роботи таких систем ґрунтується на випромінюванні коротких лазерних імпульсів і реєстрації часу їх повернення після відбиття від поверхні цілі. За результатами аналізу часової затримки формується просторово-розподілена модель сцени у вигляді тривимірного масиву вимірювань.

LiDAR-сенсори використовують надшвидкі імпульси лазерного випромінювання різних спектральних діапазонів. На практиці переважно застосовуються ультрафіолетове, видиме або ближнє інфрачервоне випромінювання, вибір якого визначається умовами використання та оптичними властивостями об'єктів. Коли лазерний імпульс досягає перешкоди, частина енергії відбивається і повертається до приймальної оптики LiDAR-системи за умови, що геометрія та оптичні характеристики поверхні забезпечують достатній

рівень відбитого сигналу. Система фіксує інтервал часу між моментом випромінювання та моментом реєстрації відбитого імпульсу.

Оскільки швидкість поширення світла є відомою фізичною константою (приблизно 299 792 км/с у вакуумі), відстань до об'єкта обчислюється на основі шляху, пройденого імпульсом. З огляду на те, що випромінювання проходить двосторонній шлях (до цілі та назад), у розрахунках використовується половина добутку швидкості світла на вимірний час затримки; інакше оцінена відстань була б завищеною у два рази [5].

$$S = \frac{(c \times t_{\text{затримки}})}{2} \quad (1.1)$$

Сучасні LiDAR-системи здатні формувати від тисяч до мільйонів імпульсів за секунду, що дає змогу паралельно вимірювати відстань до великої кількості точок у просторі. Унаслідок цього утворюється так звана хмара точок – сукупність дискретних просторових координат, які відображають геометрію поверхонь та об'єктів у полі зору сенсора. Кожна точка, як правило, описується тривимірними координатами та може містити додаткові параметри, наприклад інтенсивність відбитого сигналу. Отримані дані підлягають подальшому опрацюванню й використовуються для аналізу сцени, побудови 3D-моделей, реконструкції об'єктів, моделювання та розв'язання інших прикладних задач.

1.2.2. Переваги LiDAR-сенсора

LiDAR-технології характеризуються сукупністю переваг, які зумовлюють їхнє широке впровадження в інженерних, наукових та прикладних системах. Однією з провідних властивостей є висока точність просторових вимірювань. Завдяки високій часовій роздільній здатності та прецизійному вимірюванню затримки проходження імпульсу до об'єкта й назад LiDAR-системи можуть забезпечувати визначення відстаней із похибками на рівні кількох сантиметрів. Такий рівень точності є критично важливим у задачах, що потребують детальної

просторово-геометричної інформації, зокрема під час автономної навігації транспортних засобів, високоточного топографічного знімання, проектування та контролю інженерної інфраструктури.

Суттєвою перевагою є широкий робочий діапазон вимірювань. Залежно від параметрів лазерного випромінювача, чутливості приймального модуля та відбивних характеристик цілі LiDAR-сенсори спроможні реєструвати об'єкти як на малих, так і на значних дистанціях – від одиниць до сотень метрів. Це забезпечує можливість ефективного застосування як в умовах щільної міської забудови, так і під час обстеження відкритих територій із формуванням комплексних тривимірних моделей великих просторів.

На відміну від пасивних оптичних систем, функціонування LiDAR практично не залежить від зовнішнього освітлення, оскільки джерелом випромінювання є власний лазер. Це дає змогу отримувати стабільні дані як у нічний час, так і за інтенсивного природного освітлення. Зазначена властивість є особливо важливою для цілодобового моніторингу, нічної навігації автономних платформ, роботи в умовах обмеженої видимості та оперативного реагування на надзвичайні ситуації.

Ще однією ключовою характеристикою є висока швидкодія. Завдяки можливості генерувати та реєструвати значну кількість імпульсів за одиницю часу LiDAR-системи здатні в режимі, наближеному до реального часу, формувати детальну тривимірну картину оточення. Це особливо важливо для динамічних сцен, де об'єкти змінюють своє положення, а інформація має швидко оновлюватися. Наприклад, у системах автономного керування транспортними засобами дані LiDAR використовують для виявлення перешкод і змін дорожньої обстановки та подальшого формування безпечної траєкторії руху.

Хмари точок високої щільності, що генеруються LiDAR-сенсорами, створюють інформативну основу для поглибленого аналізу та моделювання. Кожна точка описує конкретне положення на поверхні об'єкта, що дає змогу виконувати високоточні 3D-реконструкції, будувати DEM, будівель та технічних споруд. Такий рівень деталізації є важливим для задач віртуальної та доповненої

реальності, створення цифрових двійників у системах «розумного» міста, а також для моніторингу стану об'єктів культурної спадщини.

Окремо слід відзначити універсальність та адаптивність LiDAR-рішень. Існують різні конфігурації: повітряні, наземні та мобільні платформи. Аеро-LiDAR комплекси використовують переважно для великомасштабних знімків місцевості; стаціонарні наземні системи – для деталізованого картографування будівель, інженерних споруд та інтер'єрів; мобільні комплекси, встановлені на транспортних засобах, застосовують для швидкого сканування дорожньої інфраструктури та транспортних коридорів. Така варіативність конфігурацій дозволяє гнучко адаптувати технологію до вимог конкретної галузі.

LiDAR-технології перебувають у стадії інтенсивного розвитку. Удосконалення лазерних джерел, сенсорних елементів, систем обробки сигналів, а також впровадження новітніх алгоритмів аналізу хмар точок (зокрема на основі методів машинного навчання та глибинних нейронних мереж) сприяють підвищенню точності, швидкодії, а також зменшенню масогабаритних показників і вартості обладнання. Сукупність цих факторів веде до розширення сфер використання LiDAR-систем і створює підґрунтя для їх широкої інтеграції в сучасні системи автоматизованого моніторингу, навігації та виявлення об'єктів, зокрема БПЛА.

1.2.3. Сфери застосування LiDAR-систем

LiDAR-технології на сучасному етапі знайшли широке застосування у різних сферах, оскільки забезпечують високоточну просторову інформацію та дають змогу формувати детальні тривимірні моделі об'єктів і навколишнього середовища.

Одним із ключових напрямів використання є автономні транспортні засоби. У таких системах LiDAR-сенсор виконує роль основного елемента підсистеми сприйняття оточення. На основі LiDAR-вимірювань формується тривимірне представлення простору в режимі, наближеному до реального часу, що дає змогу транспортному засобу виявляти перешкоди, ідентифікувати

структуру дорожньої сцени, відстежувати рух інших учасників та своєчасно приймати рішення щодо маневрування. Висока точність та оперативність оновлення даних безпосередньо визначають рівень безпеки й надійності автономних систем керування.

Вагому роль LiDAR відіграє у топографічному картографуванні. Використання LiDAR-комплексів дає змогу отримувати DEM та інші топографічні продукти з високою просторовою роздільною здатністю. Такі дані застосовуються у землевпорядкуванні, містобудівному плануванні, проектуванні та розвитку інженерної інфраструктури. Важливою перевагою є здатність LiDAR частково «проникати» крізь крону дерев і відтворювати параметри реальної поверхні землі, що є особливо актуальним для лісистих і важкодоступних територій.

У сфері моніторингу навколишнього середовища LiDAR-дані використовуються для аналізу стану та динаміки природних ресурсів. Застосування LiDAR дає змогу оцінювати просторову структуру лісів, визначати біомасу, аналізувати зміни рослинного покриву в часі. На основі цих даних досліджується вплив кліматичних змін, плануються заходи з охорони середовищ існування диких тварин, а також оцінюються наслідки природних небезпек, зокрема повеней, зсувів та ерозійних процесів.

Археологічні дослідження також істотно виграли від упровадження LiDAR-технологій. Високодетальні DEM дають змогу виявляти приховані під густою рослинністю археологічні об'єкти, давні шляхи, вали та інші елементи ландшафту. Це забезпечує більш цілеспрямований вибір перспективних ділянок для розкопок і дає змогу оптимізувати планування польових робіт, зменшуючи витрати часу та матеріальних ресурсів.

У містобудуванні та проектуванні інфраструктури LiDAR-системи застосовуються для побудови тривимірних моделей міських просторів і окремих споруд. Такі моделі використовуються під час проектування нових будівель, транспортних розв'язок, інженерних комунікацій, а також для аналізу технічного стану існуючих об'єктів та мереж. LiDAR-дані дають змогу оцінювати

використання простору, обґрунтовувати рішення щодо реконструкції, розвитку міської інфраструктури та підвищення її стійкості.

Сільське господарство є ще однією перспективною сферою впровадження LiDAR. У межах концепції точного землеробства LiDAR-дані використовуються для деталізованого опису рельєфу полів, аналізу структури рослинного покриву, планування систем зрошення та оптимізації агротехнологічних операцій. Отримані тривимірні моделі сприяють раціональнішому використанню ресурсів, підвищенню урожайності та зниженню експлуатаційних витрат.

У гірничодобувній промисловості LiDAR застосовується для просторового аналізу і моніторингу кар'єрів, відвалів та інших гірничих об'єктів. На основі хмар точок формуються точні DEM, що використовуються для контролю обсягів видобутку, оцінювання стабільності схилів, планування гірничих робіт та управління ресурсами. Це підвищує рівень безпеки та забезпечує ефективніше планування виробничих процесів.

Прибережні та морські застосування LiDAR охоплюють картографування берегових зон і мілководних акваторій. Батиметричні LiDAR-комплекси дають змогу визначати глибини та формувати цифрові моделі дна, що є важливим для навігаційного забезпечення, планування заходів із захисту берегової лінії, управління прибережними територіями та реалізації програм охорони морських екосистем.

1.2.4. Модель VLP-16 компанії Velodyne

Модель VLP-16 компанії Velodyne є компактним багатоканальним LiDAR-сенсором, який у даній роботі розглядається як основний засіб тривимірного зондування простору. Сенсор містить 16 лазерних каналів (випромінювачів з відповідними приймачами) та оснащений обертовим механізмом у герметичному, захищеному корпусі. Завдяки цьому забезпечується безперервне кругове сканування з формуванням щільної тривимірної хмари точок у режимі, наближеному до реального часу, що є критично важливим для задач навігації, картографування та виявлення об'єктів.

Робота VLP-16 характеризується чітко організованою часовою структурою послідовності спрацьовування лазерів. Повний цикл охоплює 16 послідовних імпульсів із фіксованим інтервалом між сусідніми каналами, після чого реалізується коротка пауза та цикл повторюється з періодом близько 55 мкс. Такий періодичний режим випромінювання та перезарядження каналів забезпечує стабільність, рівномірність збору даних і спрощує їх подальшу синхронізацію та обробку.

На рисунку 1.1 наведено часові параметри послідовності запалювання лазерних каналів давача VLP-16.

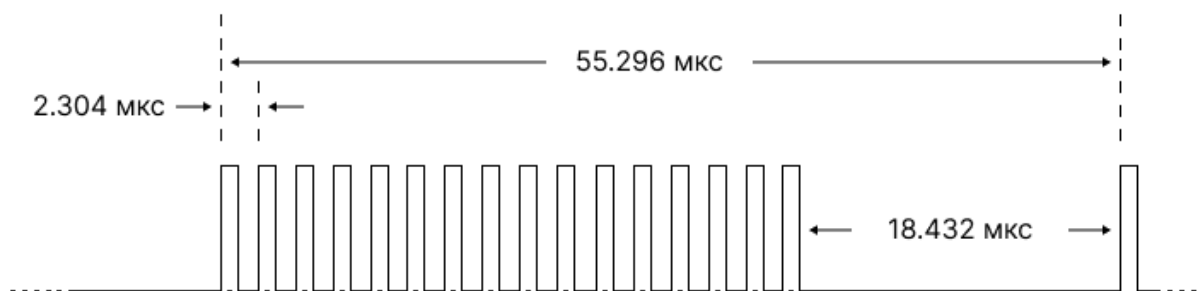


Рис. 1.1. – Часові параметри послідовності запалювання лазерних каналів сенсора VLP-16

У сенсорі застосовуються напівпровідникові лазерні діоди, робота яких ґрунтується на інжекції носіїв заряду через р-п-перехід з подальшим стимульованим випромінюванням фотонів та формуванням вузького когерентного променя. Випромінювачі VLP-16 належать до лазерів класу 1, що відповідає високим вимогам лазерної безпеки: за умови дотримання правил експлуатації випромінювання не створює значної небезпеки для зору, що дає змогу інтегрувати сенсор у різноманітні прикладні системи [2].

Поєднання надійної конструкції, високої частоти формування імпульсів і точного механізму синхронізації робить VLP-16 ефективним інструментом для широкого спектра інженерних задач – від автономного транспорту та мобільної робототехніки до геодезичних і картографічних застосувань. Захищений корпус

забезпечує стійку роботу пристрою в різних кліматичних та експлуатаційних умовах, що підсилює його практичну цінність у наукових дослідженнях і технічних розробках.

1.2.5. Застосування LiDAR-сенсора в системі сенсорного контролю

На рисунку 1.2 подано узагальнену структурну схему системи тривимірного зондування, що ґрунтується на використанні LiDAR-технології. Вона відображає взаємодію апаратних та програмних компонентів, які спільно забезпечують збір, передавання, обробку та просторову прив'язку 3D-даних. Подібні системи застосовуються в автономному транспорті, мобільній робототехніці та картографуванні, де необхідна висока точність просторового сприйняття.

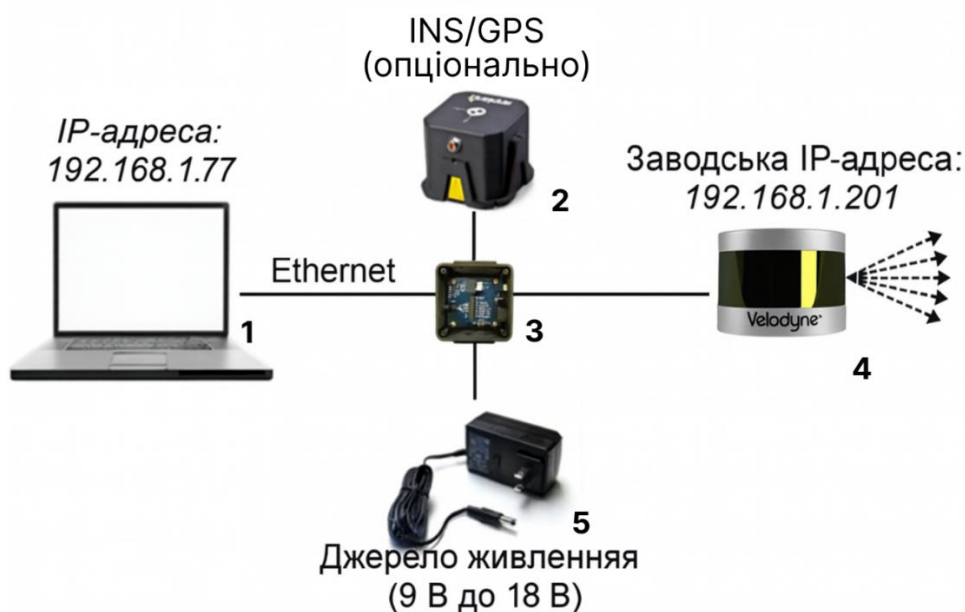


Рис. 1.2. – Структурна схема системи 3D-зондування з використанням LiDAR-сенсора

Першим основним елементом є персональний комп'ютер або ноутбук (позначення 1 на рисунку 1.2), що виконує функції центрального обчислювального вузла. Комп'ютер налаштовується на IP-адресу тієї ж мережевої підмережі, що й інтерфейсний блок *Velodyne*, що забезпечує

коректний мережевий обмін. На ньому встановлюється спеціалізоване програмне забезпечення для приймання, первинної обробки, візуалізації в реальному часі та збереження даних LiDAR.

Інтерфейсна коробка Velodyne (позначення 3) виконує роль комунікаційного модуля між комп'ютером і LiDAR-сенсором. З'єднання з комп'ютером, як правило, реалізується через Ethernet, що дає змогу передавати значний обсяг даних із необхідною пропускну здатністю. Інтерфейсний блок живиться від джерела постійного струму й окремим кабелем підключається до сенсора, забезпечуючи передавання вимірювальної інформації та, за потреби, живлення LiDAR.

За наявності вимог до геопросторової прив'язки до системи додатково підключається модуль INS/GPS з антеною (позначення 2). INS в поєднанні з GPS-приймачем забезпечує отримання даних про положення та орієнтацію платформи, дозволяючи синхронізувати траєкторію руху з LiDAR-вимірюваннями навіть за умов обмеженого прийому супутникового сигналу.

Основним вимірювальним компонентом комплексу є LiDAR-сенсор (позначення 4). Його робота базується на випромінюванні лазерних імпульсів і вимірюванні часу їх повернення після відбиття від об'єктів (принцип time-of-flight). На основі цього часу обчислюється відстань до точок сцени, формуючи тривимірну хмару точок, що описує геометрію оточення. Залежно від моделі сенсор може забезпечувати огляд до 360° у горизонтальній площині, що дозволяє отримувати панорамне представлення простору та застосовувати його для високоточного картографування, виявлення й класифікації об'єктів.

Загальна послідовність роботи системи є такою: LiDAR-сенсор, живлення якого реалізується безпосередньо або через інтерфейсний блок, випромінює лазерні промені в навколишній простір; відбиті імпульси реєструються приймачами, перетворюються у цифрові дані та передаються до інтерфейсної коробки. Далі інформаційний потік надходить на комп'ютер, де програмне забезпечення виконує декодування, візуалізацію, додаткову обробку й архівацію. У разі використання INS/GPS часові мітки та навігаційні дані синхронізуються з

хмарою точок, забезпечуючи коректне геопросторове віднесення тривимірних вимірювань.

1.2.6. Режими відбиття лазерних імпульсів

LiDAR-сенсор VLP-16 підтримує три режими реєстрації відбитих сигналів: режим найсильнішого відбиття, режим останнього відбиття та режим подвійного відбиття. Вибір режиму визначає, які імпульси будуть збережені в хмарі точок і, відповідно, впливає на інтерпретацію сцени в умовах наявності кількох відбивних поверхонь.

Після випромінювання лазерний імпульс може послідовно взаємодіяти з кількома об'єктами (наприклад, кроною дерева та поверхнею ґрунту за нею), формуючи серію відбиттів. У режимі найсильнішого відбиття фіксується сигнал з максимальною інтенсивністю, тобто від поверхні, що повертає найбільшу частку енергії імпульсу. Це є доцільним, зокрема, під час картографування міського середовища, коли важливо надійно виділяти добре відбивні об'єкти: дорожні знаки, світлоповертаючі елементи розмітки, номерні знаки тощо.

Режим останнього відбиття реєструє найбільш пізній у часі сигнал, який зазвичай відповідає найвіддаленішому об'єкту вздовж променя. Такий підхід застосовується, коли необхідно отримати інформацію про поверхню, розташовану за перешкодою, наприклад, при визначенні рельєфу під лісовим наметом у задачах повітряного лазерного сканування та лісового господарства.

Режим подвійного відбиття є компромісним: сенсор одночасно зберігає як найсильніше, так і останнє відбиття за умови, що відповідні об'єкти відділені один від одного не менш ніж на 1 м. Це дозволяє описати як верхні шари рослинності, так і підстильну поверхню, що є важливим для оцінювання висоти дерев, розрахунку біомаси та аналізу вертикальної структури лісу. Якщо найсильніше та останнє відбиття збігаються, VLP-16 додатково фіксує друге за інтенсивністю відбиття, зберігаючи інформативність вимірювань у складних сценах.

Коректний вибір режиму потребує урахування співвідношення між потужністю випромінювання, відбивною здатністю об'єкта та відстанню до нього. Відбивна здатність визначається матеріалом, станом і мікрогеометрією поверхні та у VLP-16 подається у вигляді інтенсивності в діапазоні від 0 до 255. Це дає змогу розрізняти дифузні відбивачі (шорсткі поверхні, стовбури дерев) і ретровідбивачі (дорожні знаки, спеціальні мітки), що повертають сигнал практично назад до сенсора, і відповідно налаштовувати режим відбиття під конкретну задачу.

На рисунках 1.3-1.5 наведено типові схеми формування відбиттів.

На рисунку 1.3 показано випадок одиничного відбиття, коли один відбитий лазерний імпульс одночасно є і найсильнішим, і останнім.

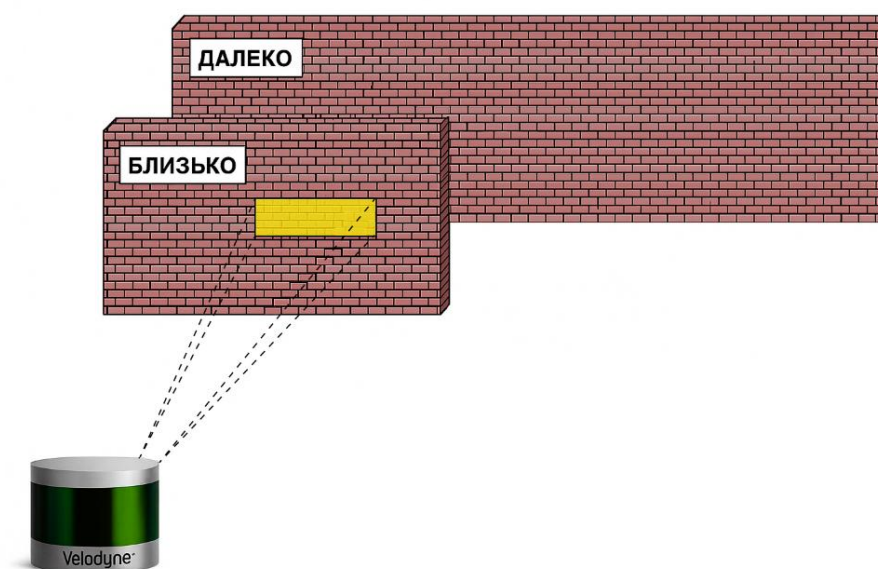


Рис. 1.3. – Схема одиничного відбиття

На рисунку 1.4 продемонстровано ситуацію з двома поверхнями на різних відстанях, у якій у режимі подвійного відбиття реєструються обидва сигнали.

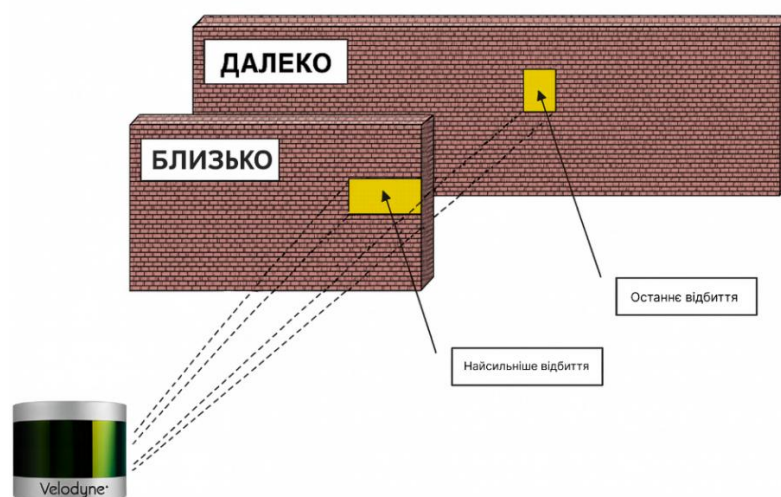


Рис. 1.4. – Схема подвійного відбиття

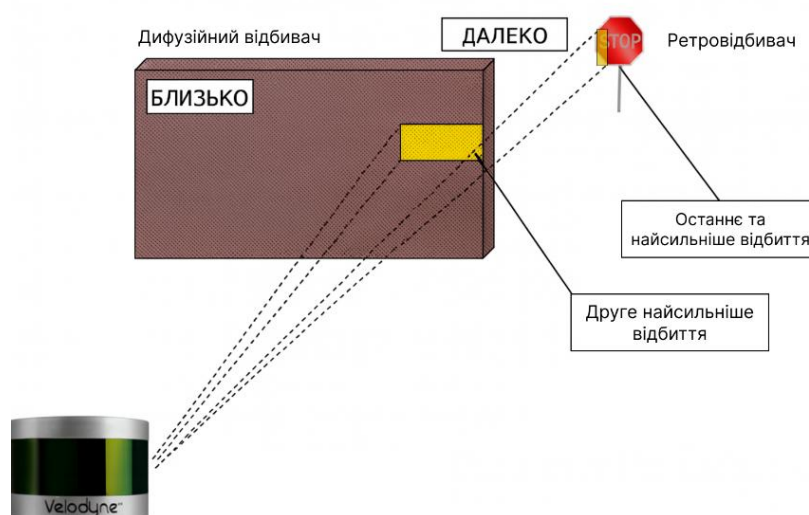


Рис. 1.5. – Подвійне відбиття з далеким ретровідбивачем

На рисунку 1.5 наведено приклад із далеким ретровідбивачем, коли найсильніше відбиття може відповідати або ближній, або дальній поверхні залежно від геометрії сцени та характеристик відбивачів.

1.3. Процеси виявлення та обробки даних

У подальшому під виявленням БПЛА розумітиметься ситуація, коли LiDAR-сенсор реєструє принаймні одну просторову точку, що однозначно

належить його поверхні. Тобто факт виявлення ототожнюється з появою у хмарі точок хоча б одного елемента, асоційованого з БПЛА. Для коректного аналізу необхідно задати геометричні умови, за яких така реєстрація є можливою.

З цією метою вводяться два кутові параметри, які схематично показано на рисунках 1.6 та 1.7.

На рисунку 1.6 подано положення PTU з установленим LiDAR-сенсором і введено кути, що характеризують її орієнтацію.

На рисунку 1.7 зображено взаємне розташування PTU, БПЛА та світової системи координат, у якій задаються кутові величини.



Рис. 1.6. – Кут нахилу PTU та кут внутрішнього обертання LiDAR

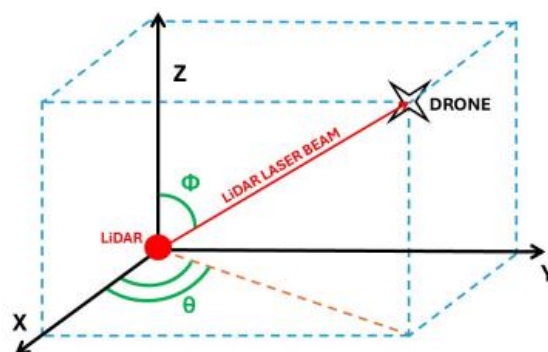


Рис. 1.7. – PTU, БПЛА та відповідна світова система координат

Надалі використовуються такі позначення:

- кут θ описує поворот турелі навколо осі z і відповідає азимутальному переміщенню PTU
- кут ϕ характеризує внутрішнє обертання (спін) скануючого блока LiDAR відносно його власної осі

У наступних підрозділах ці параметри застосовуватимуться для формалізації умов виявлення та побудови алгоритмів обробки вимірювальних даних.

1.3.1. Виділення та опрацювання записаних даних

ArduPilot є відкритою програмно-апаратною платформою автопілота, призначеною для керування різними типами безпілотних рухомих об'єктів (багатороторні та фіксованокрилі БПЛА, наземні й надводні роботизовані платформи). Завдяки модульній архітектурі та розвинутому функціоналу система широко використовується як в аматорських, так і в професійних застосуваннях, забезпечуючи автоматизацію навігації та керування бортовими системами під час виконання складних місій.

У ході польоту під керуванням ArduPilot формується значний обсяг телеметричних даних: висота й швидкість, кутова орієнтація, GPS-координати, стан акумуляторної батареї, показники інерціальних, барометричних та інших давачів. Ці параметри в режимі реального часу реєструються контролером польоту і зберігаються у вигляді журналів (log-файлів), які слугують основним джерелом інформації для аналізу роботи апарата, діагностики можливих відхилень і вдосконалення алгоритмів керування.

Запис даних виконується вбудованою підсистемою реєстрації: контролер безперервно опитує бортові сенсори, формує записи й зберігає їх на карті пам'яті або, за відповідної конфігурації, передає на наземну станцію для моніторингу та дублювання журналів.

Для подальшої обробки журнали переносяться на персональний комп'ютер і імпортуються до середовища MATLAB за допомогою функції `Ardupilog`, яка читає бінарний log-файл за заданим шляхом і формує структуру даних з усіма зафіксованими параметрами. На наступному етапі з GPS-повідомлень виділяються вектори довготи, широти та висоти, а на основі часових міток формується відповідний часовий ряд. Це забезпечує можливість відновлення траєкторії польоту та детального аналізу динаміки руху БПЛА в просторі та часі.

1.3.2. Вихідні дані обчислювальної частини

Результати програмної обробки експериментальних вимірювань подано на рисунках 1.8-1.12.

На рисунку 1.8 показано часові залежності кута повороту платформи PTU та курсового кута БПЛА.

Синя крива описує обертання PTU зі сталою кутовою швидкістю (характерний «зубчастий» профіль із ділянками сталого нахилу), тоді як червона крива відтворює зміну курсу БПЛА, отриману з журналів ArduPilot.

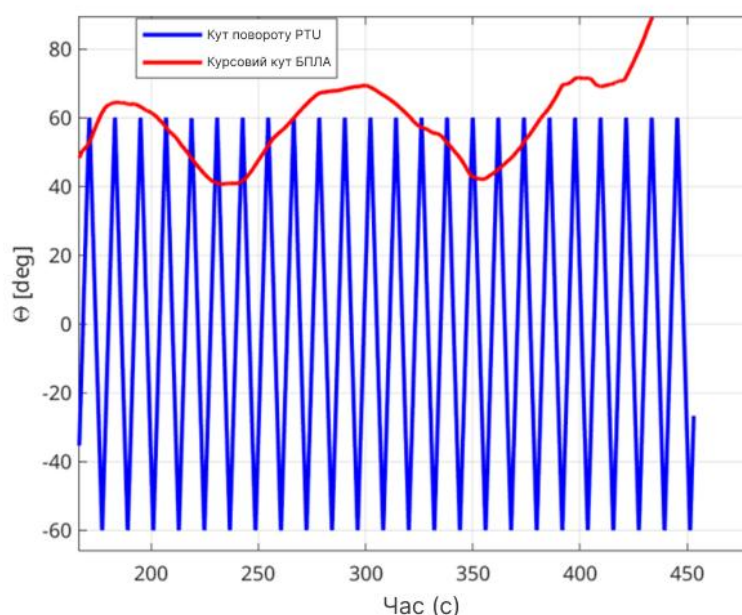


Рис. 1.8. – Зміна кута повороту PTU та курсового кута БПЛА в часі

Подальший аналіз зосереджено на моментах перетину цих двох кривих, які відповідають збігу азимутального напрямку PTU (а разом з ним і оптичної осі LiDAR) з поточним курсом БПЛА.

Один із таких моментів докладно проілюстровано на рисунку 1.9, де локально збільшено окол часу $t \approx 231,683$ с.

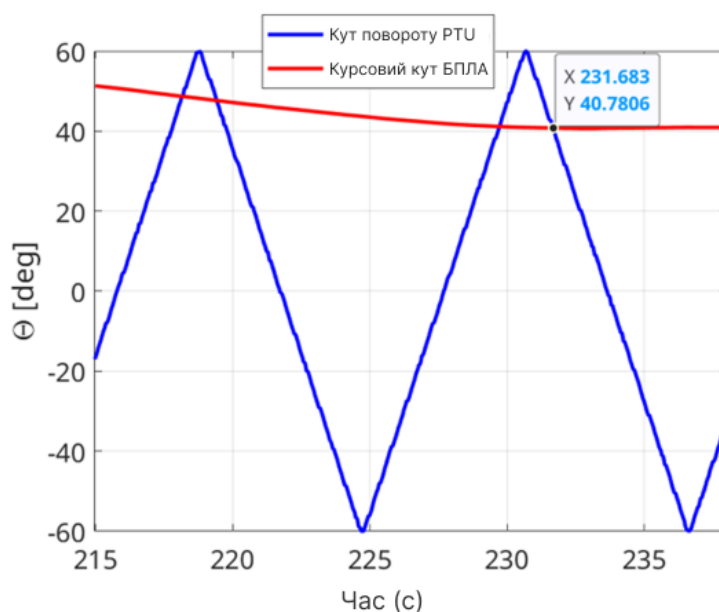


Рис. 1.9. – Локальне збільшення кута повороту РТУ та відхилення БПЛА в околі $t \approx 231,683$ с

Разом з тим узгодження панорамного кута РТУ з курсовим кутом БПЛА саме по собі ще не гарантує реєстрації БПЛА. Необхідно, щоб у той самий момент внутрішній кут обертання LiDAR, зумовлений послідовним спрацюванням 16 лазерних каналів, також був узгоджений із положенням БПЛА. Інакше можлива ситуація, коли сенсор зорієнтовано в правильному азимуті, але жоден з променів у даний такт сканування не потрапляє на БПЛА.

Часовий хід внутрішнього обертання LiDAR та кута тангажу БПЛА наведено на рисунку 1.10, а збільшений фрагмент у околі $t \approx 231,683$ с – на рисунку 1.11. Червона лінія відповідає тангажу БПЛА, зелена – внутрішньому куту обертання скануючого блока. Оскільки розглядається інтервал порядку 0,02 с, траєкторія БПЛА виглядає майже горизонтальною.

Важливо, що для часу $t = 231,683$ с на рисунку 1.11 також спостерігається перетин зеленої та червоної кривих, тобто оптична вісь одного з каналів LiDAR спрямована в бік БПЛА.

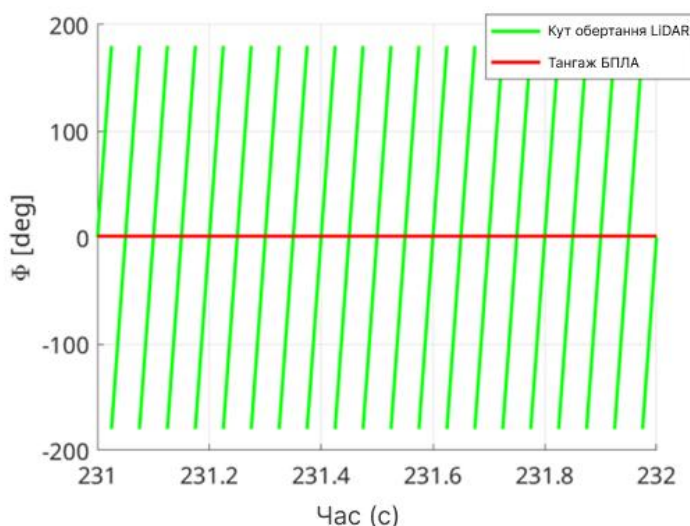


Рис. 1.10. – Внутрішній кут обертання LiDAR та тангаж БПЛА у загальному вигляді

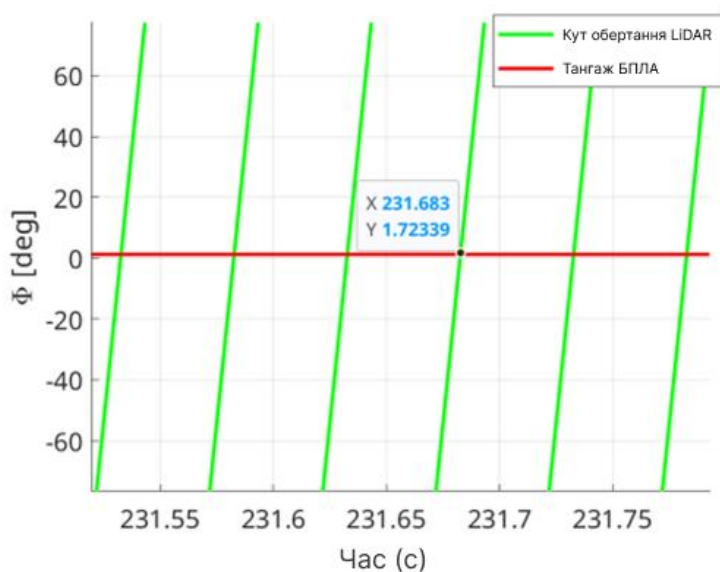


Рис. 1.11. – Внутрішній кут обертання LiDAR та тангаж БПЛА у збільшеному масштабі

Остаточний висновок про факт виявлення потребує ще однієї перевірки – наявності реального випромінювання лазерного імпульсу в зазначений момент.

На рисунку 1.12 подано часову діаграму спрацювань лазерних імпульсів у збільшеному масштабі.

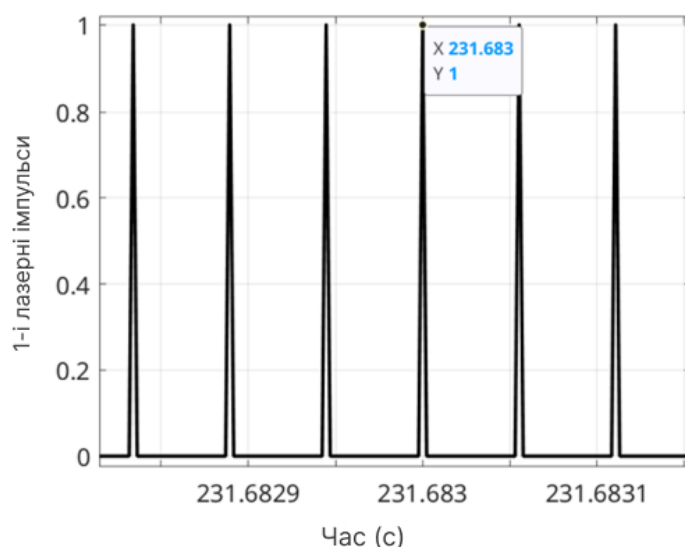


Рис. 1.12. – Часова діаграма спрацювань лазерних імпульсів LiDAR у збільшеному масштабі

Із аналізу цієї діаграми встановлено, що один із імпульсів був випущений саме при $t = 231,683$ с, що збігається з моментами перетину кривих на рисунках 1.9 та 1.11. Отже, для даного епізоду одночасно виконуються всі необхідні умови – збіг курсу БПЛА з поворотом PTU, узгодження тангажу з внутрішнім обертанням LiDAR та наявність лазерного пострілу – і факт виявлення БПЛА вважається підтвердженим.

1.4. Проміжки між послідовними вимірюваннями

Для аналізу просторової дискретизації LiDAR-вимірювань було виконано візуалізацію лазерних плям на поверхні об'єкта за допомогою інфрачервоної камери.

На рисунку 1.13 показано характерний вигляд відбиттів, де формується регулярний візерунок прямокутних плям із трьома паралельними смугами світла. На кільцевому вікні випромінювача розмір типової плями становить приблизно 9,5 мм по висоті та 12,7 мм по ширині; зі збільшенням відстані до об'єкта, з урахуванням розбіжності променя, розмір плями зростає.

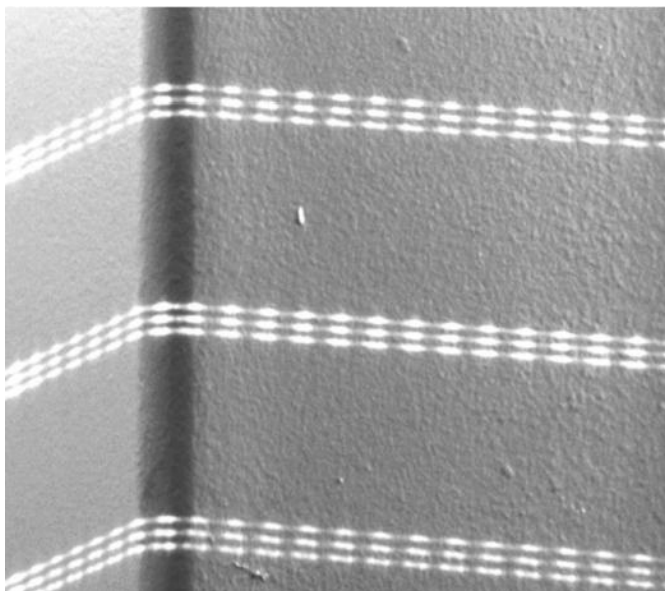


Рис. 1.13. – Лазерні плями на стіні

LiDAR VLP-16 має вертикальний масив із 16 лазерних каналів, зорієнтованих під різними кутами у вертикальній площині. Під час обертання внутрішнього модуля формуються лінії сканування, де кожна лінія складається з послідовності точок, а сусідні лінії відповідають різним вертикальним кутам. Відстань між ними на цілі зростає з дальністю та може бути оцінена наступним виразом:

$$gap = S \times \tan(\Delta\alpha_{vert}), \quad (1.2)$$

де gap – проміжок між лініями сканування на відстані S , а $\Delta\alpha_{vert}$ – вертикальний кут між відповідними лазерними променями.

Схему формування цих проміжків подано на рисунках 1.14-1.16.

На рисунку 1.14 наведено верхній вигляд LiDAR із позначенням напрямків променів під час обертання внутрішнього сканера.

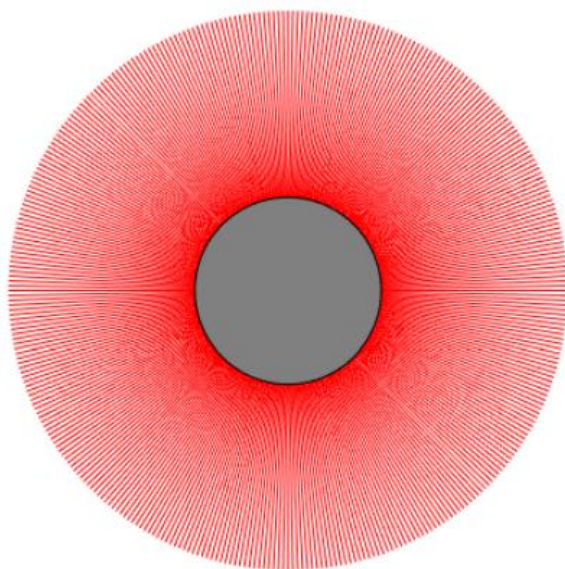


Рис. 1.14. – Верхній вигляд LiDAR під час обертання внутрішнього сканера

На рисунку 1.15 подано частковий фрагмент верхнього вигляду, який акцентує увагу на проміжках між сусідніми променями.

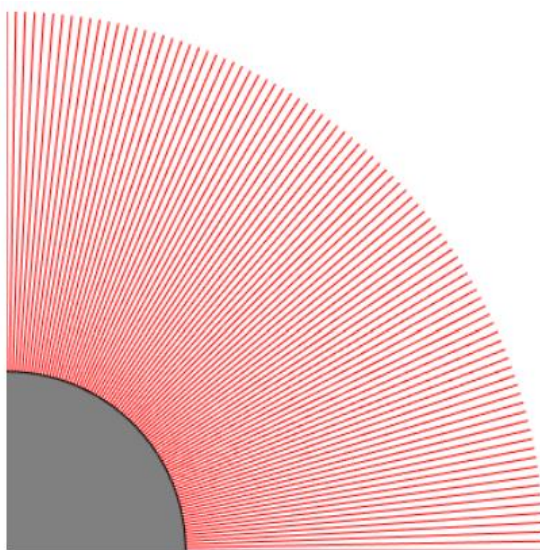


Рис. 1.15. – Фрагмент верхнього вигляду LiDAR з виділеними проміжками між променями

На рисунку 1.16 зображено бічний вигляд LiDAR із 16 вертикальними променями, що розташовані в різних площинах.

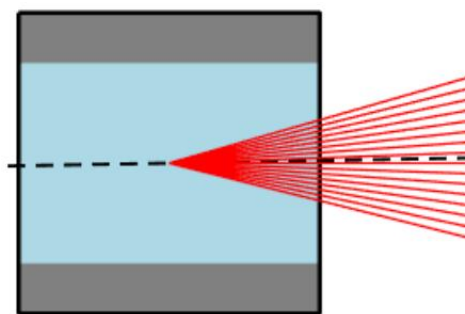


Рис. 1.16. – Бічний вигляд LiDAR із 16 вертикальними променями

Наявність проміжків між лініями сканування істотно обмежує можливість виявлення малогабаритних цілей на великих дистанціях: із зростанням дальності ймовірність того, що БПЛА опиниться між сусідніми лініями, збільшується, а факт реєстрації стає випадковою подією. Це ускладнює як первинне виявлення, так і подальше стабільне відстеження траєкторії.

Для зменшення цього ефекту в пропонованій системі передбачається динамічне «фокусування» сканування в напрямку БПЛА. Під фокусуванням розуміють сповільнення, зміну напрямку або тимчасову зупинку панорамного руху LiDAR у бік БПЛА за допомогою поворотно-нахильної платформи PTU-E46 (FLIR Systems), при цьому використовується лише поворот навколо осі z . LiDAR, змонтований на турелі, обертається відповідно до обраного закону руху PTU, що дозволяє збільшити кількість вимірювань, які потрапляють безпосередньо на корпус БПЛА, та зменшити невизначеність оцінки його положення.

Підвищення ймовірності виявлення розглядається як ключовий чинник ефективності системи. На етапі моделювання планується дослідити вплив параметрів руху PTU та режимів сканування LiDAR на статистичні показники виявлення, а надалі – підтвердити отримані результати серією натурних експериментів у реальних умовах експлуатації.

1.5. Висновки до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи:

- Проведено огляд сучасних підходів до виявлення і супроводження БПЛА (акустичні системи, CW-радар з GMM, Ku-діапазонні та пасивні РЛС, твердотільні LiDAR-сенсори).
- Обґрунтовано вибір LiDAR як базового засобу просторового спостереження.
- Розглянуто принцип дії, переваги та основні сфери застосування LiDAR-технології.
- Описано конструктивні та функціональні особливості багатоканального сенсора VLP-16 компанії Velodyne.
- Описано структурну схему системи тривимірного зондування з використанням LiDAR, PTU та модуля INS/GPS, а також реєстрації відбиттів лазерних імпульсів і їх вплив на інформативність хмари точок.
- Формалізовано умови виявлення БПЛА за даними LiDAR через введення кутів орієнтації PTU та внутрішнього обертання скануючого модуля, а також послідовність виділення й опрацювання експериментальних даних на основі журналів ArduPilot.
- Проаналізовано просторову дискретизацію вимірювань LiDAR VLP-16.
- Показано вплив проміжків між лініями сканування на ймовірність реєстрації малогабаритних БПЛА.
- Обґрунтовано доцільність динамічного «фокусування» сканування в напрямку БПЛА за допомогою PTU.

Сукупність отриманих результатів формує теоретичне й методичне підґрунтя для подальшої розробки алгоритмів підвищення точності виявлення та супроводження БПЛА з використанням LiDAR-сенсора.

РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Методика розробки системи

На початковому етапі функціонування комплексу необхідно забезпечити виявлення БПЛА, тобто реєстрацію БПЛА в полі зору LiDAR-сенсора. Далі виконується відстеження траєкторії БПЛА шляхом безперервної оцінки його просторового положення. Для підвищення ефективності цього процесу передбачається адаптивна зміна режимів руху LiDAR через керування PTU, що дає змогу збільшити час перебування БПЛА в полі зору та кількість вимірювань по БПЛА.

У цьому розділі послідовно розглядаються принципи роботи програмно-апаратних компонентів системи з акцентом на їх взаємодії: апаратні модулі, вузли ROS та формати даних, якими вони обмінюються. Окремо описуються механізми виявлення та ідентифікації БПЛА та їх інтеграція в загальну архітектуру комплексу.

Для наочного подання структури й логіки функціонування на рисунку 2.1 наведено блок-схему послідовності обробки LiDAR-даних: від формування хмари точок сенсором до формування команд руху для PTU та передавання оцінених центроїдів у EKF.

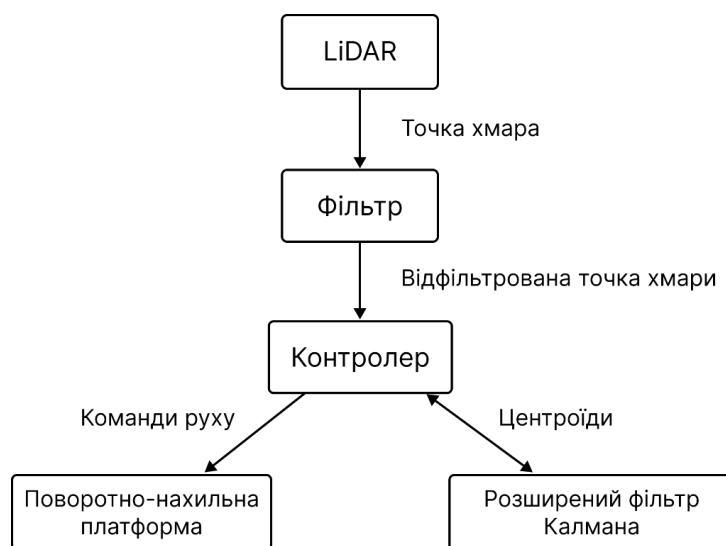


Рис. 2.1. – Блок-схема системи обробки даних LiDAR для відстеження БПЛА

Оскільки будову та принцип дії LiDAR та платформи PTU розглянуто в попередніх підрозділах, подальший виклад зосереджено на описі вузлів ROS, що реалізують програмну частину системи, а також на їхніх функціях і взаємодії.

2.1.1. Вузол «Фільтр»

Вузол «Фільтр», реалізований мовою C++, одержує хмару точок із теми /velodyne та послідовно виконує двоетапну просторову фільтрацію:

- фільтрація за координатами XYZ;
- відбір точок за допомогою 3D-фільтра опуклої оболонки.

На першому етапі застосовується XYZ-фільтр, який обмежує хмару точок прямокутним паралелепіпедом робочої зони. Габарити цієї зони попередньо визначено за даними сервісу Google Earth з урахуванням фактичного місця встановлення LiDAR; під час натурних випробувань додатково перевірялося, що всередині обраного об'єму немає стаціонарних перешкод, здатних спотворювати результати. Попереднє «грубе» обрізання має важливе обчислювальне значення, оскільки надалі кожна точка перевіряється на належність до внутрішнього об'єму багатогранника, і зменшення їх кількості суттєво прискорює роботу.

Після цього в межах обрізаної області будується 3D-опукла оболонка, яка точніше описує геометрію робочої зони. Вузол публікує її у вигляді маркера, що дає змогу візуалізувати межі відбору в інструментах ROS у режимі реального часу. Для власне фільтрації використовується функція CropHull бібліотеки Point Cloud Library (PCL): попередньо обчислена оболонка виступає маскою, і з вихідної хмари зберігаються лише точки, що потрапляють у внутрішній об'єм. Відібрана хмара перетворюється у формат повідомлення ROS і публікується в темі /filteredpoints для подальшого використання контролером, алгоритмами відстеження та засобами візуалізації.

Паралельно відфільтровані дані записуються у файл CSV, де для кожної точки зберігаються координати, часовий штамп, індекс кільця та номер послідовності повідомлення. Це забезпечує можливість детального офлайн-

аналізу, відтворення роботи системи та діагностики на подальших етапах дослідження.

2.1.2. Вузол «Контролер»

Вузол «Контролер», реалізований мовою C++, формує команди руху для PTU та опрацьовує результати LiDAR-вимірювань. Для PTU передбачено чотири режими руху, з яких у кожен момент активний лише один: базовий режим суцільного сканування (режим «Sweeping») та три адаптивні режими – коливального сканування (режим «Swing»), сповільненого сканування (режим «Slow-Down») і тимчасової зупинки (режим «Stop»), що використовуються для локального збільшення кількості вимірювань по БПЛА в межах заданого кутового сектора.

У режимі коливального сканування платформа здійснює маятниковоподібний рух між двома граничними кутами. Перемикання режимів описується автоматом станів: після виконання заданої кількості коливань PTU автоматично повертається до режиму «Sweeping» з оглядом повного кутового діапазону. Режим «Slow-Down» реалізується зменшенням кутової швидкості у кілька разів; коли відхилення від початкового кута перевищує заданий поріг, платформа знову переходить до стандартного режиму Sweeping. У режимі «Stop» швидкість обертання тимчасово зменшується до дуже малої величини, а тривалість паузи задається таймером, після чого відновлюється номінальна швидкість.

Паралельно вузол «Контролер» отримує відфільтровану хмару точок від вузла «Фільтр», виконує просторову кластеризацію та обчислює центроїди кластерів. Їх координати зберігаються у файлі CSV. Помітне зміщення між послідовними центроїдами інтерпретується як зміна положення БПЛА й слугує підставою для ініціювання нового циклу руху та зміни режиму. Усі переходи між станами, активні режими руху та пов'язані дані протоколюються для подальшого аналізу.

Адаптивні режими сканування (коливання, сповільнення, тимчасова зупинка) активуються лише за наявності непорожньої відфільтрованої хмари точок; за відсутності корисних даних RTU продовжує стандартне «патрулювання» між двома налаштовуваними граничними кутами. Окрім керування платформою, вузол «Контролер» передає координати центроїдів до вузла «Розширений фільтр Калмана», інтегруючи підсистему керування рухом із підсистемою оцінювання стану БПЛА.

2.1.3. Вузол «Розширений фільтр Калмана»

Вузол «Розширений фільтр Калмана» підписується на ROS-тему з координатами центроїдів кластерів, які публікує вузол-регулятор. Перший центроїд використовується для ініціалізації вектора стану, після чого фільтр циклічно виконує кроки прогнозування та корекції, уточнюючи оцінку траєкторії БПЛА. На етапі прогнозу застосовується модель переходу станів, яка обчислює очікуваний стан через інтервал часу Δt на основі попередньої оцінки, а на етапі оновлення – виконується корекція за новими вимірюваннями центроїда.

У розробленій системі вектор стану розмірності шість описує положення та швидкість центроїда в тривимірному просторі (три координати й три компоненти швидкості). Вузол додатково публікує відфільтровані координати в окремій темі та зберігає в CSV-файлах прогнозовані та скориговані стани, матриці коваріації й допоміжні параметри. Передбачено механізм виявлення втрати БПЛА: за зростанням елементів матриці коваріації та часового інтервалу від останнього вимірювання робиться висновок про втрату БПЛА, після чого фільтр переходить у режим повторної ініціалізації й знову запускається при надходженні нового центроїда.

Математична реалізація EKF ґрунтується на стандартних рівняннях прогнозу (2.1) й оновлення (2.2):

– Прогноз:

$$\begin{aligned}
x_p &= F \cdot x; \\
x &= x_p; \\
P_p &= F \cdot P \cdot F^T + Q; \\
P &= P_p;
\end{aligned} \tag{2.1}$$

– Оновлення:

$$\begin{aligned}
z &= \begin{bmatrix} x_{\text{centroid}} \\ y_{\text{centroid}} \\ z_{\text{centroid}} \end{bmatrix}; \\
e &= z - H \cdot x_p; \\
S &= H \cdot P_p \cdot H^T + R; \\
K &= P_p \cdot H^T \cdot S^{-1}; \\
x &= x_p + K \cdot e; \\
P &= (I - K \cdot H) \cdot P_p;
\end{aligned} \tag{2.2}$$

У рівняннях 2.1-2.2 вектор стану x містить координати та швидкості центроїда, матриця коваріації P відображає невизначеність оцінки, матриця переходу F задає еволюцію стану між дискретними моментами часу, а матриця шуму процесу Q описує невизначеність моделі руху. Вектор вимірювань z містить координати X, Y, Z центроїда, матриця вимірювання H пов'язує модельний стан із вимірюваними величинами, матриця R задає дисперсії шумів вимірювання, одинична матриця I використовується під час оновлення коваріації, а індекс p позначає прогнозовані значення.

Структура матриць, що застосовуються у фільтрі, подається у вигляді:

– Матриця переходу станів F :

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

- Матриця коваріації шуму процесу Q :

$$Q = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

- Матриця вимірювання H :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

- Матриця коваріації вимірювального шуму R :

$$R = \begin{bmatrix} (1)^2 & 0 & 0 \\ 0 & (1)^2 & 0 \\ 0 & 0 & (0.2)^2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

- Початкова матриця коваріації стану P :

$$P = \begin{bmatrix} (1)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (0.2)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (4)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (4)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (4)^2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Числові значення елементів цих матриць вибрано з урахуванням динаміки руху БПЛА та точності LiDAR-вимірювань. Матриця переходу F описує модель руху з постійною швидкістю при часовому кроці $\Delta t = 0,05$ с (частота оновлення

20 Гц): діагональні елементи відповідають збереженню поточних значень, недіагональні, пропорційні Δt , – впливу швидкості на зміну координат. У матриці Q задано невеликі однакові діагональні елементи (0,01), що відображає помірний рівень невизначеності моделі руху й залишає можливість її корекції за вимірюваннями.

Матриця вимірювання H формує вектор вимірювань лише з координат положення: компоненти швидкості безпосередньо не вимірюються, тому відповідні елементи в H дорівнюють нулю. У матриці R враховано анізотропію похибок: для координат x та y прийнято дисперсію 1, для координати z – 0,2, що відповідає іншому рівню довіри до вертикальної компоненти. Початкова матриця P задає вищу невизначеність швидкості порівняно з положенням (дисперсії для координат – 1, для швидкостей – 16), завдяки чому фільтр інтенсивніше коригує оцінки швидкостей у процесі роботи.

У сукупності таке налаштування EKF забезпечує стійке відстеження БПЛА та дає змогу порівнювати різні режими руху платформи RTU й сканування LiDAR, обираючи конфігурацію з найкращою ймовірністю виявлення та точністю відновлення положення цілі.

2.2. Експериментальна установка та конфігурація

Як об'єкт випробувань у системі відстеження використовувався квадрокоптер Sky Hero Spyder X4, загальний вигляд якого наведено на рисунку 2.2. Рама апарата з вуглецевого волокна має розмах близько 0,85 м. Квадрокоптер оснащено електродвигунами з коефіцієнтом 400 об/хв/В та LiPo-акумулятором 6S ємністю 16 000 мА·год. Навігаційний комплекс включає приймач Drotek DP0601 GNSS із зовнішньою антеною, магнітометр Drotek RM3100 та два IMU. Злітна маса становить орієнтовно 5,5 кг, тривалість польоту – до 45 хв, що достатньо для проведення тривалих експериментів та накопичення репрезентативних даних.



Рис. 2.2. – Квадрокоптер Sky Hero Spyder X4

Система виявлення та відстеження складається із трьох основних компонентів:

- поворотно-нахильної платформи PTU-E46 (FLIR Systems), призначеної для високошвидкісного наведення корисного навантаження, з максимальною масою до 4 кг, кутовою швидкістю понад $300^{\circ}/\text{с}$ та роздільною здатністю близько $0,129^{\circ}$;
- 3D-друкованої опори, змонтованої у верхній частині PTU, яка забезпечує жорстке кріплення LiDAR та запобігає перекриттю пучка променів;
- LiDAR Velodyne VLP-16 із максимальною дальністю вимірювання до 200 м, продуктивністю близько 600 тис. точок/с, круговим горизонтальним полем зору 360° та вертикальним – 40° .

На рисунках 2.3-2.5 наведено 3D-кріплення LiDAR, сам сенсор VLP-16 та загальний вигляд інтегрованого комплексу відстеження.



Рис. 2.3. – 3D-друкована опора LiDAR



Рис. 2.4. – LiDAR-сенсор Velodyne VLP-16



Рис. 2.5. – Інтегрований комплекс відстеження

Для коректного порівняння стратегій руху PTU траєкторію польоту БПЛА планувалася так, щоб він постійно залишався всередині попередньо визначеної опуклої оболонки робочої зони, необхідної для другого етапу фільтрації хмари точок. Маршрут намагалися максимально відтворювати в усіх серіях випробувань, мінімізуючи вплив зовнішніх чинників.

На рисунку 2.6 показано систему в процесі натурних випробувань під час реалізації стратегії типу Stop Motion, коли PTU тимчасово фіксується у напрямку виявленого положення БПЛА для збільшення кількості LiDAR-вимірювань по БПЛА.



Рис. 2.6. – Система відстеження під час натурних випробувань із зафіксованим БПЛА у полі зору LiDAR

У ході експериментів для кожної стратегії руху PTU формувалися окремі набори даних, що зберігалися у вигляді CSV-файлів та журналів:

- відфільтровані точки – підмножина вихідної хмари LiDAR, що одночасно належить обмеженій XYZ-області та 3D-опуклій оболонці вузла «Фільтр»;

- центроїди кластерів, обчислені у вузлі «Контролер» та збережені разом із часовими мітками;
- файл станів із часовими моментами переходів між режимами руху (зокрема між режимами суцільного та коливального сканування);
- розширені значення EKF – час, вектор стану $x = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]$ та діагональні елементи матриці коваріації P ;
- файл ROS bag із повним записом відповідних ROS-повідомлень для подальшого відтворення експерименту;
- журнали ArduPilot з телеметрією (GPS, IMU, стан акумулятора, висота, швидкість, режими польоту тощо).

Комплексний аналіз цих даних дає змогу кількісно порівняти реалізовані траєкторні стратегії PTU та обрати конфігурацію руху, що забезпечує найвищу ймовірність виявлення і точність відстеження БПЛА. Узагальнення результатів і порівняльний аналіз подано у розділі 3.

2.3. Висновок до другого розділу

У другому розділі кваліфікаційної роботи:

- Розроблено загальну методику побудови системи виявлення і супроводження БПЛА на основі LiDAR-сенсора й PTU.
- Описано програмно-апаратну архітектуру комплексу в середовищі ROS із виділенням функцій вузлів «Фільтр», «Контролер» та «Розширений фільтр Калмана» та форматів обміну даними між ними.
- Сформовано алгоритми просторової фільтрації та кластеризації хмари точок, адаптивного керування режимами руху PTU («Sweeping», «Swing», «Slow-Down», «Stop») і оцінювання траєкторії БПЛА за допомогою EKF.
- Спроектовано й описано експериментальну установку з квадрокоптером Sky Hero Spyder X4 та LiDAR Velodyne VLP-16, а також структуру наборів даних і журналів для подальшого порівняльного аналізу траєкторних стратегій PTU.

РОЗДІЛ 3.

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Валідація методів та системи

У цьому розділі наведено результати поетапної перевірки працездатності апаратно-програмного комплексу на основі LiDAR-сенсора. Валідація проводилася у три стадії, спрямовані на оцінювання окремих функціональних властивостей системи.

I етап, який описано у підрозділі 3.1.1, полягав у чисельному моделюванні в середовищі MATLAB для двох типових сценаріїв руху БПЛА, а саме для горизонтального прольоту перед фронтально розташованим LiDAR та вертикального підльоту у напрямку сенсора. Моделювання дало змогу оцінити базові можливості виявлення цілі та дослідити зміну кількості реєстрацій залежно від траєкторії та положення БПЛА відносно сенсора, сформувавши очікувані характеристики роботи системи перед натурними випробуваннями.

II етап передбачав експерименти в реальних умовах за фіксованого положення LiDAR. Метою було підтвердження коректності роботи C++-вузлів у середовищі ROS: «Фільтр», «Контролер» та «Розширений фільтр Калмана». Вузол «Поворотно-нахильна платформа» навмисно не активувався, щоб виключити вплив руху сенсора. Випробування проводилися на відкритій терасі. Просторове обмеження даних здійснювалося за допомогою опуклої оболонки, нижню межу якої задано вище зросту оператора, що гарантувало обробку лише даних із релевантного тривимірного об'єму.

У I натурному тесті оператор багаторазово рухався по прямій траєкторії до LiDAR та від нього. Це дало змогу перевірити базову здатність системи відстежувати лінійний рух та оцінити роботу EKF під час наближення й віддалення. Оскільки сенсор залишався нерухомим, виявлені похибки однозначно пов'язувалися з роботою фільтра та активних вузлів.

У II тесті оператор рухався трьома різними прямими маршрутами на різних відстанях від LiDAR. Така варіація дозволила оцінити стійкість EKF до зміни

траєкторій та дистанцій. Для взаємодії з робочим 3D-об'ємом оператор тримав у руках великий знак, піднімаючи відбивну поверхню в зону дії фільтра. Це підтвердило коректність просторової фільтрації (відсікання об'єктів нижче заданої висоти) та здатність ЕКФ і пов'язаних вузлів відокремлювати корисні відбиття від фону й підтримувати стабільне відстеження.

Результати II етапу засвідчили коректну роботу вузлів «Фільтр», «Контролер» та «Розширений фільтр Калмана» у статичній конфігурації та дали базові оцінки їх продуктивності. Вузол керування «Поворотно-нахильна платформа» було задіяно лише на третій стадії.

Заключний, III етап валідації проводився з використанням RTU із установленим LiDAR. Сенсор перебував у безперервному обертанні, тоді як оператор рухався по квадратній траєкторії навколо LiDAR. Таким чином моделювався динамічний сценарій з одночасним рухом БПЛА й сенсора.

Такий підхід наближав умови до реальної експлуатації зі змінним полем зору. Аналізувалася точність виявлення та стабільність супроводу БПЛА за рухомої платформи, а також можливості ЕКФ щодо інтеграції швидко змінюваних вхідних даних. Фільтр мав забезпечити надійне прогнозування й корекцію стану за одночасного переміщення БПЛА та сенсора, що стало жорстким тестом алгоритмічної стійкості розробленої системи.

Послідовне виконання трьох описаних етапів – від модельних досліджень до натурних експериментів із рухомою платформою RTU – дало змогу всебічно охарактеризувати систему та підтвердити ефективність запропонованих методів обробки LiDAR-даних.

3.1.1. I етап. Моделювання траєкторії БПЛА в MATLAB

У межах I етапу валідації в середовищі MATLAB було виконано серію числових експериментів для оцінювання впливу траєкторії польоту БПЛА на ефективність його виявлення нерухомим LiDAR-сенсором. На рисунках 3.1-3.6 подано геометрію розглянутих сценаріїв та відповідні траєкторії відносно положення сенсора.

На рисунку 3.1 розглянуто горизонтальний політ, де БПЛА рухається прямою, паралельною осі y , на фіксованій відстані 3 м від LiDAR (уздовж осі x). Стартова позиція становить -20 м уздовж осі y , після чого апарат проходить 40 м. Кількість спрацювань системи залежить від поточного положення БПЛА: поблизу центра траєкторії він перебуває в ефективній зоні огляду й реєструється частіше, тоді як на початку та в кінці шляху частково виходить за межі поля зору, що зменшує число виявлень.

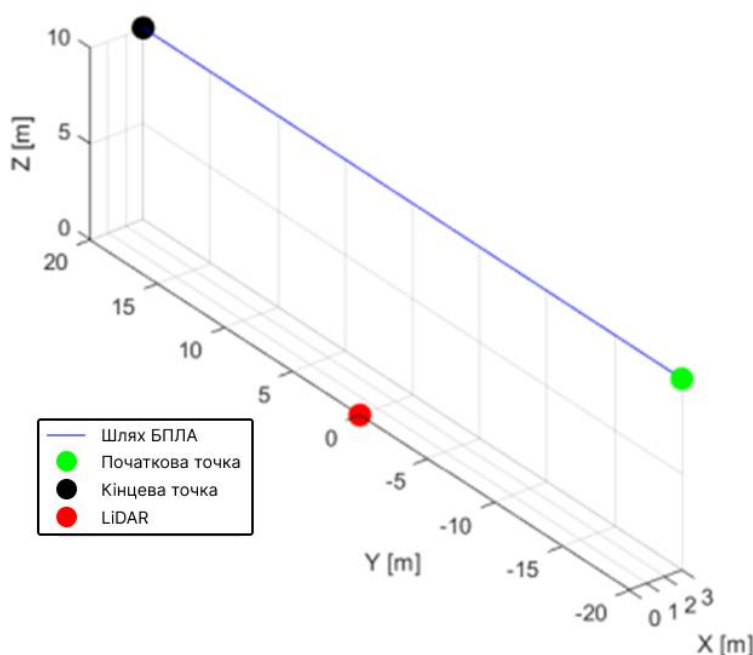


Рис. 3.1. – Горизонтальна траєкторія польоту БПЛА паралельно осі y на відстані 3 м від LiDAR

Сценарій, що подано на рисунку 3.2 відповідає «вертикальному» польоту вздовж осі x безпосередньо у напрямку LiDAR. БПЛА стартує з відстані 20 м і прямує прямо до сенсора. Упродовж усього руху він залишається в секторі огляду, що забезпечує істотно більшу кількість виявлень, ніж у горизонтальному випадку, де майже вся траєкторія проходить у робочому діапазоні сенсора.

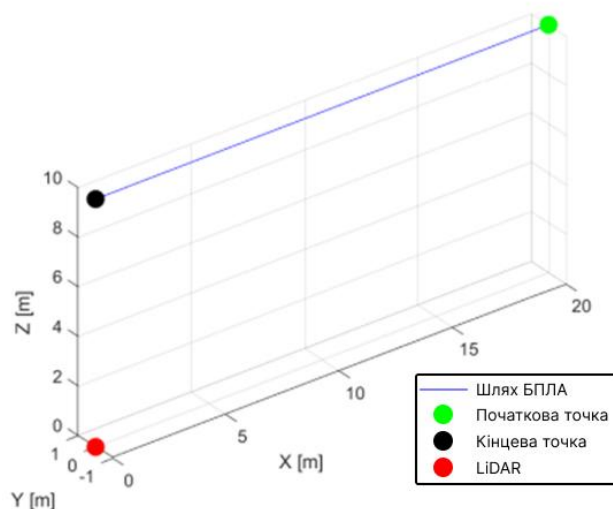


Рис. 3.2. – Фронтальна траєкторія зближення БПЛА з LiDAR уздовж осі x

На рисунках 3.3 та 3.4 наведено результати моделювання для горизонтального руху вздовж осі x на більших відстанях від LiDAR – 7 м та 12 м. Із зростанням поперечного віддалення кількість виявлень очікувано зменшується: БПЛА займає меншу кутову область у полі зору, а енергія відбитого сигналу спадає, що ускладнює реєстрацію окремих положень.

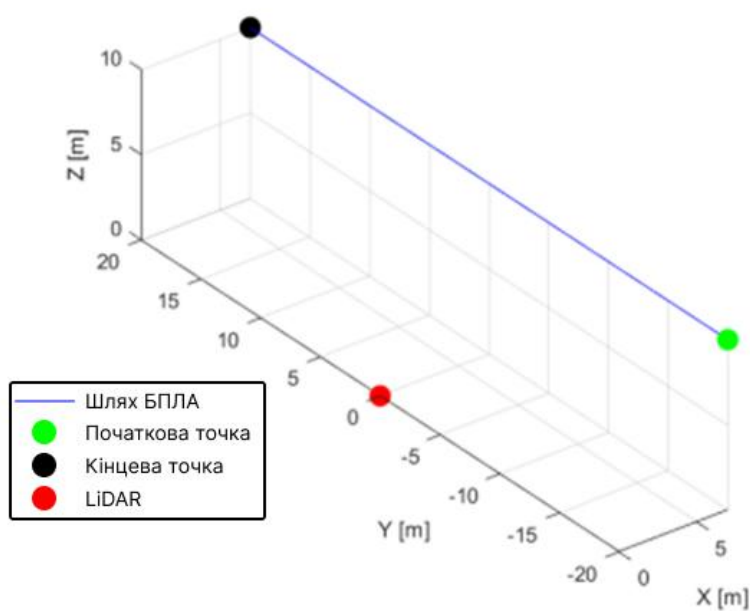


Рис. 3.3. – Горизонтальна траєкторія польоту БПЛА на відстані 7 м від LiDAR

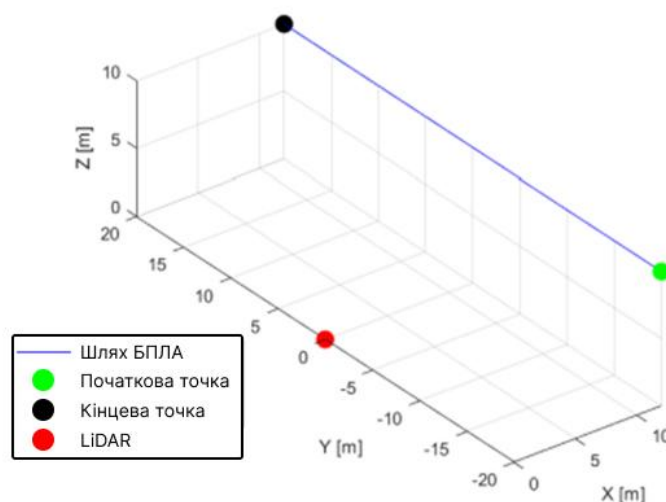


Рис. 3.4. – Горизонтальна траєкторія польоту БПЛА на відстані 12 м від LiDAR

На рисунках 3.5 та 3.6 подано траєкторії руху до LiDAR уздовж осі x , але з боковим зміщенням на 3 м та 7 м. У цих конфігураціях кількість успішних виявлень менша, ніж при русі точно по осі (рисунок 3.2), оскільки частина шляху проходить по краю поля зору, і окремі положення БПЛА не потрапляють до зони впевненої роботи сенсора.

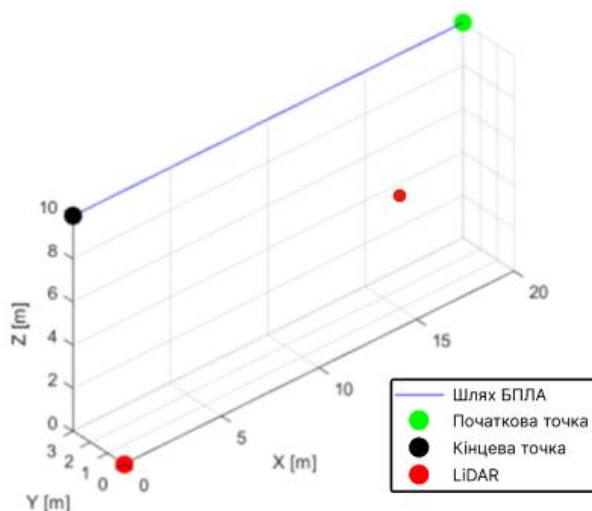


Рис. 3.5. – Фронтальна траєкторія зближення БПЛА з LiDAR з боковим зміщенням 3 м

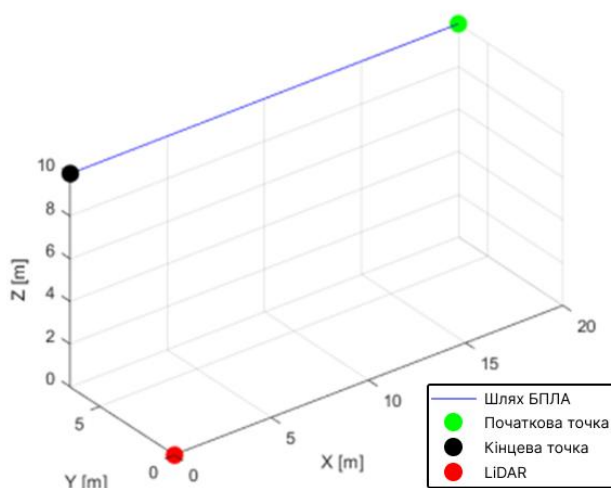


Рис. 3.6. – Фронтальна траєкторія зближення БПЛА з LiDAR з боковим зміщенням 7 м

Зазначимо, що для горизонтальних траєкторій уздовж осі y збільшення відстані до LiDAR спричиняє більш плавне зменшення кількості виявлень, ніж для руху уздовж осі x . У першому випадку БПЛА довше залишається в секторі огляду, тоді як при русі по осі x він швидко залишає поле зору, що веде до різкішого падіння частоти реєстрацій. Отримані результати демонструють критичну залежність ефективності виявлення від геометрії траєкторії та просторового положення БПЛА відносно нерухомого LiDAR-сенсора.

3.1.2. II етап. Рух за прямолінійними траєкторіями

На рисунку 3.7 подано результати експерименту, в якому оператор із БПЛА рухався вздовж трьох прямих, розташованих приблизно на 5-6 м від LiDAR уздовж осі x . Одна траєкторія була дещо віддаленішою, дві інші проходили близько одна до одної на відстані близько 5 м. На рисунку 3.7 спостерігається скупчення точок виявлення (блакитний колір) навколо чорних кілець, що позначають центроїди кластерів. За умови, що прямокутна мішень орієнтована площиною до сенсора, центр мас цієї площини описує майже пряму лінію, що й відображає траєкторія центроїдів.

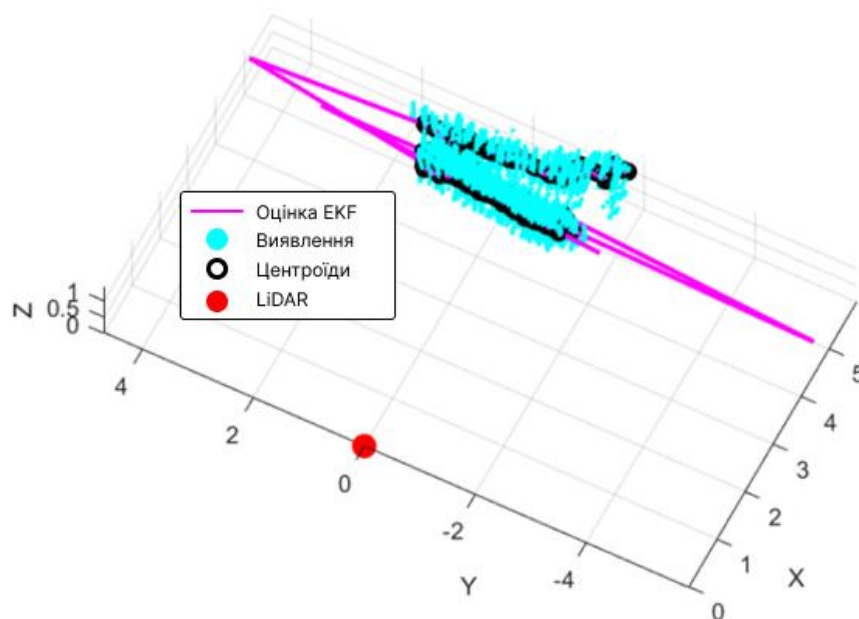


Рис. 3.7. – Відстеження БПЛА при русі вздовж трьох прямих траєкторій на фіксованій відстані від LiDAR

З рисунка 3.7 видно, що реєстрація відбиттів відбувається переважно в діапазоні по осі Y від -2 до $+2$ м; поза цими межами повернені промені не фіксуються. У проміжках без нових вимірювань EKF виконує прогноз, продовжуючи траєкторію за моделлю руху. Оцінені EKF координати виходять за межі зони реєстрації (понад 4 м ліворуч і близько -5 м праворуч уздовж осі Y), зберігаючи загальний напрямок руху.

На рисунку 3.8 наведено результати експерименту, де траєкторія БПЛА була орієнтована майже паралельно до променів LiDAR. Початкова точка розташовувалася у верхній правій частині зображення, кінцева – трохи вище. Оператор спочатку наближався до сенсора, утримуючи БПЛА у полі зору, а згодом змінював напрямок та віддалявся.

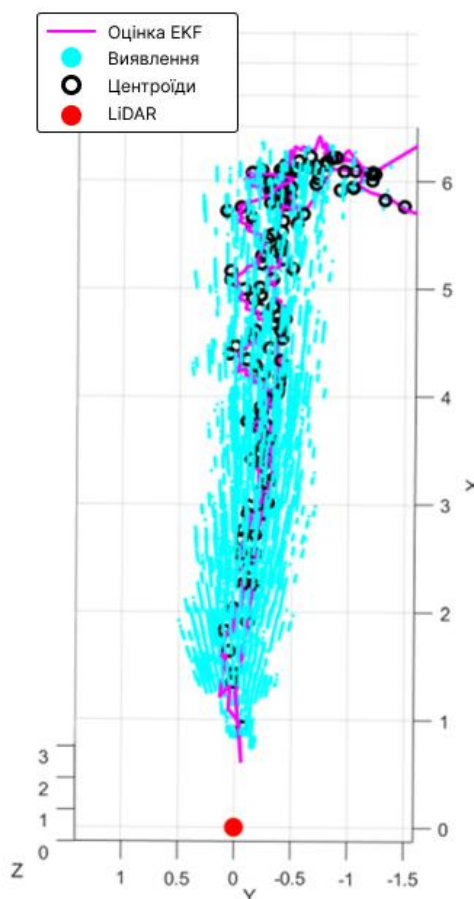


Рис. 3.8. – Відстеження БПЛА при русі вздовж траєкторії, орієнтованої паралельно променям LiDAR

Як видно з рисунка 3.8, густина точок виявлення зростає при зменшенні відстані до LiDAR і особливо після розвороту, коли траєкторія проходить поблизу сенсора. Це узгоджується з тим, що за малих дистанцій забезпечуються вища ефективна роздільна здатність і ймовірність реєстрації. Центроїди кластерів проходять через центральну частину хмари точок, що підтверджує коректність алгоритму кластеризації.

Оскільки БПЛА протягом усього експерименту залишався в межах поля зору, EKF регулярно одержував нові вимірювання, підтримуючи часті кроки оновлення. Це забезпечило поступове уточнення оцінок стану, зменшення впливу шуму та високу відповідність оціненої траєкторії реальному шляху руху БПЛА.

3.1.3. III етап. Рух за квадратними траєкторіями

На рисунку 3.9 подано тривимірне представлення роботи системи в режимі сповільненого повороту. Після виявлення кластера, інтерпретованого як повітряна ціль, платформа RTU зменшує кутову швидкість обертання приблизно до 1/4 номінальної в межах кутового сектору близько 10° .

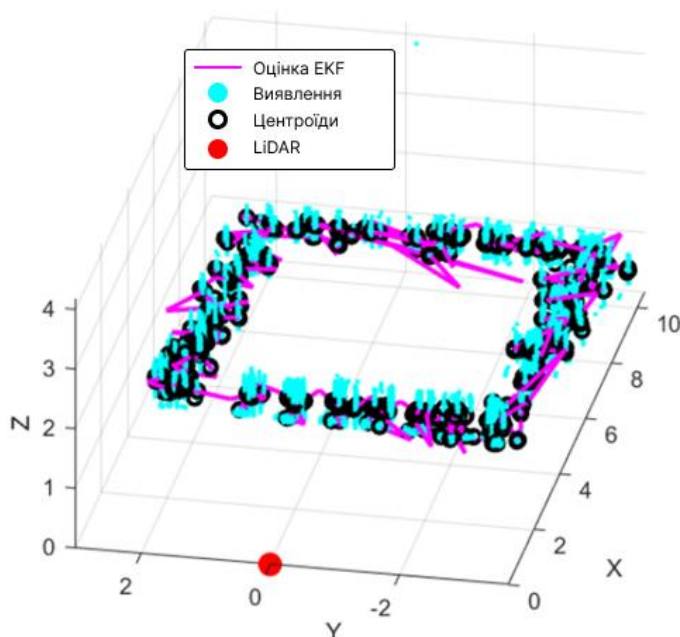


Рис. 3.9. – Відстеження БПЛА в режимі сповільненого повороту платформи RTU

За траєкторією, оціненою EKF, видно епізодичні суттєві відхилення від фактичного шляху БПЛА. Це пов'язано з тим, що вибрана стратегія руху орієнтована на швидкі переміщення, тоді як у досліді БПЛА рухався повільно. Невідповідність динаміки керування та реального руху призводить до погіршення точності оцінювання, що вказує на потребу адаптації алгоритму керування до сценаріїв із низькими швидкостями.

На рисунку 3.10 наведено результат роботи системи в режимі «Swing». Після виявлення БПЛА турель здійснює коливальний рух у вузькому секторі (приблизно $\pm 5^\circ$ навколо напрямку на БПЛА).

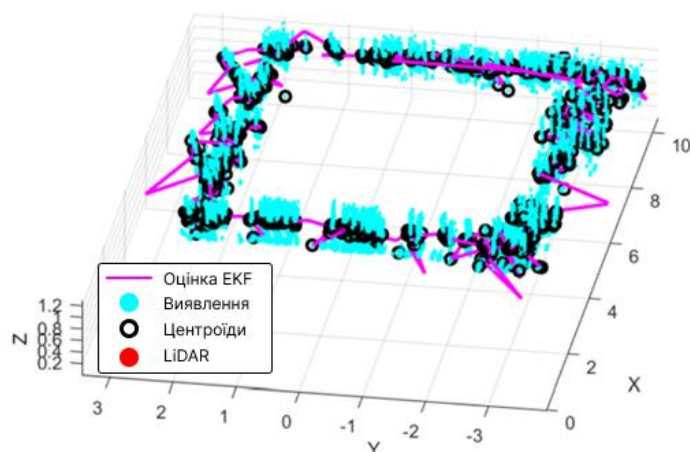


Рис. 3.10. – Відстеження БПЛА в режимі коливального руху платформи RTU

Просторовий розподіл виявлень показує, що похибки ЕКФ загалом невеликі. Коливальний рух локалізує сканування в околі одного напрямку, даючи змогу багаторазово зондувати ту саму область і накопичувати щільний масив вимірювань. Це підвищує інформативність даних та покращує якість оцінки траєкторії повільно рухомого БПЛА.

На рисунку 3.11 представлено роботу системи в режимі тимчасової зупинки «Stop». У цьому випадку, після виявлення БПЛА, RTU повністю припиняє обертання та утримує LiDAR у напрямку на БПЛА близько 5 с, після чого відновлюється стандартний рух.

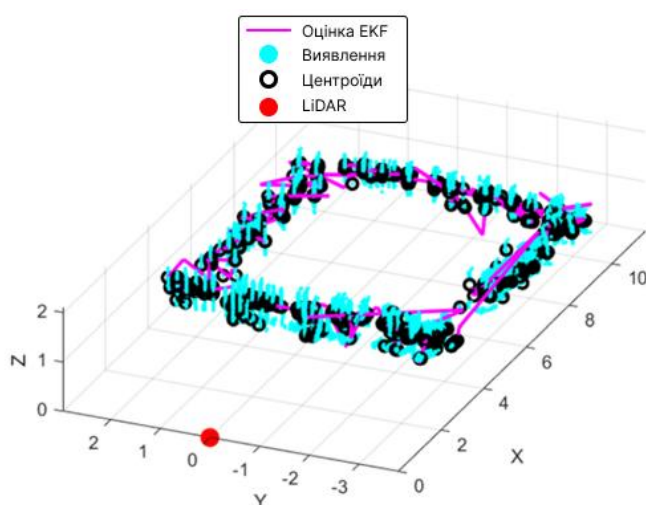


Рис. 3.11. – Відстеження БПЛА в режимі зупинки платформи RTU

Результати демонструють, що саме в цьому режимі EKF забезпечує найточніше відтворення траєкторії. Фіксація платформи й тривале утримання променя на БПЛА приводять до значного збільшення кількості виявлень і формування дуже щільної хмари точок. Велика кількість послідовних вимірювань із високим SNR дає змогу істотно зменшити невизначеність оцінок стану. Отже, режим тимчасової зупинки є найбільш придатним для малоповільних БПЛА, оскільки дозволяє «закріпити» їх положення та надати фільтру максимально інформативні дані для точного відстеження.

3.2. Результати експериментів

У цьому підрозділі розглядаються режими керування БПЛА та оцінюється їх ефективність у серії випробувань. Спочатку було проведено початковий експеримент із ручним пілотуванням БПЛА, що дало еталонні траєкторії руху. Далі проаналізовано автоматизоване керування з використанням EKF у модельованих умовах та в реальному середовищі. Завершальним етапом стало порівняння результатів для різних моделей руху в режимах ручного та автоматизованого керування з метою виявлення їхніх переваг та відмінностей.

3.2.1. Початковий тест ручного керування БПЛА

На рисунку 3.12 наведено приклад відстеження траєкторії БПЛА для режиму коливального руху «Swinging».

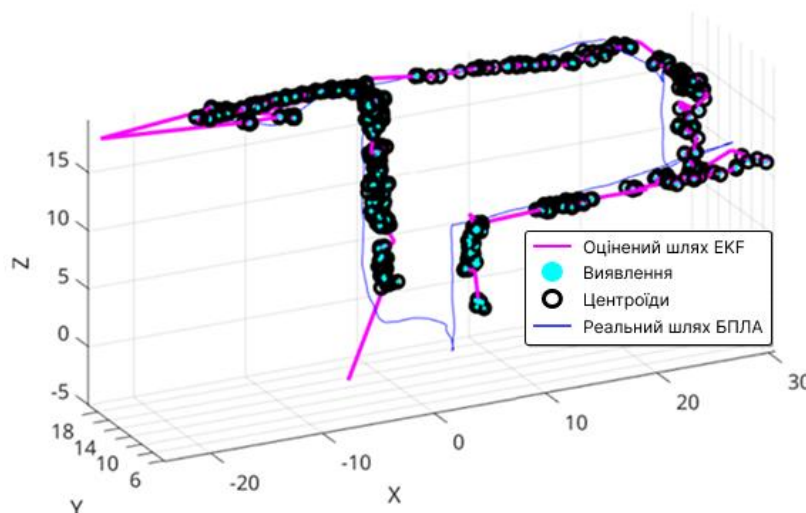


Рис. 3.12. – Відстеження траєкторії БПЛА в режимі коливального руху при ручному керуванні

Синя лінія відтворює фактичний шлях БПЛА за даними журналів ArduPilot і використовується як еталон. Блакитні точки відповідають відфільтрованим вимірюванням LiDAR, а чорні кільця – центроїдам кластерів, що обчислюються у вузлі «Контролер». На одному такті сенсор може реєструвати кілька точок від БПЛА, які групуються в кластер з одним центроїдом, тому кількість точок перевищує кількість центроїдів. Магентовий колір кривої відображає траєкторію, оцінену EKF. У ділянках із більшою щільністю виявлень, де фільтр частіше отримує нові вимірювання, точність відтворення траєкторії помітно зростає завдяки регулярній корекції стану.

На рисунку 3.13 показано результат відстеження траєкторії БПЛА в режимі «Sweeping».

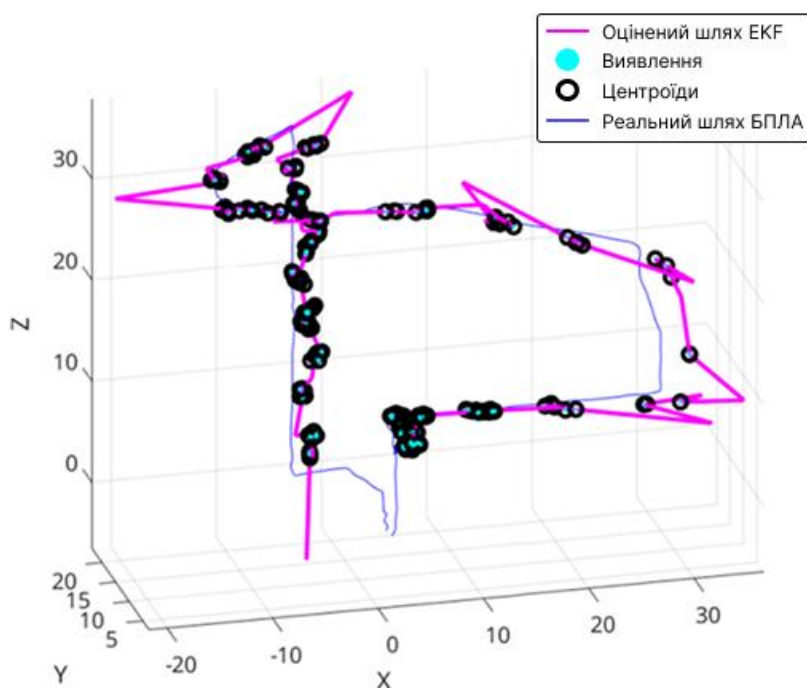


Рис. 3.13. – Відстеження траєкторії БПЛА в режимі суцільного сканування при ручному керуванні

Порівняння рисунків 3.12 і 3.13 демонструє, що в коливальному режимі накопичується значно більша кількість коректних вимірювань, а оцінка ЕКФ краще збігається з еталонною траєкторією. Це пояснюється тим, що в режимі «Swinging» LiDAR зосереджує сканування в обмеженому кутовому секторі навколо центроїда раніше виявленого кластера, уникаючи «холостого» огляду порожніх напрямків. Фокусування сканування збільшує число оновлень ЕКФ і, відповідно, підвищує точність відстеження руху БПЛА, що підтверджує переваги адаптивних стратегій сканування.

3.2.2. Моделювання автоматизованого керування БПЛА з використанням розширеного фільтра Калмана

Для підвищення відтворюваності експериментів керування БПЛА було переведено з ручного в автоматичний режим. Це дало змогу багаторазово виконувати одну й ту саму траєкторію польоту та коректно порівнювати результати для різних динамічних режимів руху.

Перед польовими випробуваннями з автоматизованим керуванням було проведено чисельне моделювання роботи ЕКФ в середовищі MATLAB. Оцінювалася здатність ЕКФ відновлювати вектор стану БПЛА (координати, швидкості, орієнтацію) за наявності шумів вимірювання та процесу. На основі моделювання уточнено параметри фільтра й підтверджено його працездатність перед застосуванням у реальних польотах. Узагальнені результати показано на рисунках 3.14 та 3.15.

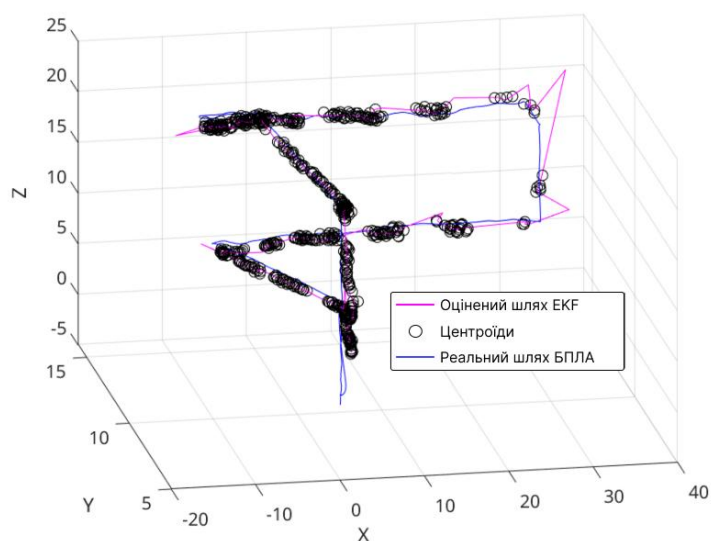


Рис. 3.14. – Априорна оцінка траєкторії БПЛА ЕКФ на етапі прогнозування

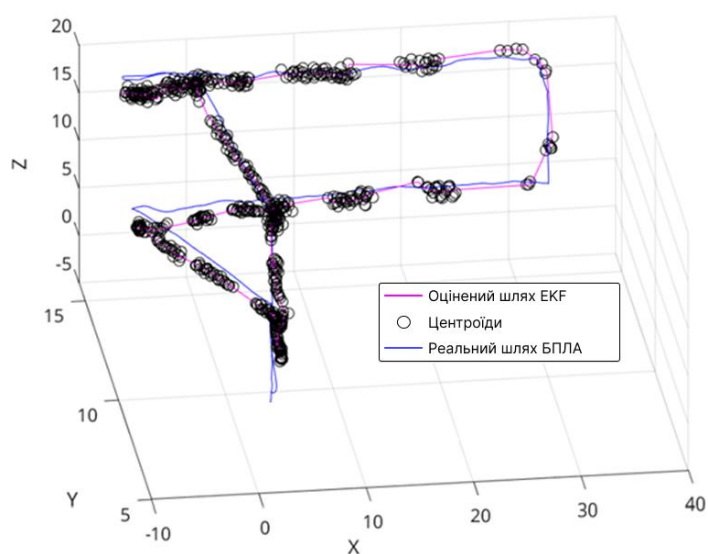


Рис. 3.15. – Априорна оцінка траєкторії БПЛА ЕКФ на етапі оновлення

На рисунку 3.14 подано траєкторію, сформовану ЕКФ на етапі прогнозування, а на рисунку 3.15 – оцінки після оновлення. В обох випадках синя лінія відповідає реальному маршруту БПЛА, відновленому за журналами ArduPilot, записаними під час автономного польоту за заданою траєкторією. У цьому польоті LiDAR та RTU працювали в коливальному режимі.

Журнали було зчитано з контролера польоту й імпортовано до MATLAB за допомогою функції Ardupilog, яка формує структуру з усіма записаними параметрами. Чорні кола на рисунках позначають центроїди кластерів, отримані з одного й того самого CSV-файлу польових експериментів. Відмінність між рисунками зумовлена виглядом магентової кривої, що відображає оцінки ЕКФ: на рисунку 3.14 – лише прогнозовані стани, на рисунку 3.15 – стани після корекції вимірюваннями.

Як показує порівняння, траєкторія на рисунку 3.15 значно краще збігається з реальною, оскільки на кроці оновлення враховуються тільки моменти надходження нових центроїдів, які «прив'язують» оцінку до фактичного положення БПЛА. Натомість графік прогнозу (див. рис. 3.14) містить більше точок, але характеризується більшою похибкою, бо відображає проміжні стани між вимірюваннями.

З обох рисунків видно, що помилка зростає зі збільшенням відстані між БПЛА і LiDAR, а саме у дальній зоні магентова крива істотніше відхиляється від синьої, тоді як поблизу сенсора оцінка ЕКФ набагато точніше відтворює реальну траєкторію. Це відповідає фізичним властивостям LiDAR, для якого точність вимірювань погіршується з віддаленням БПЛА.

3.2.3. Порівняння 3D-оціненої траєкторії з реальною траєкторією

У цьому підрозділі наведено графічні результати трьох варіантів динамічного маневрування БПЛА, які використовуються для попереднього порівняльного аналізу.

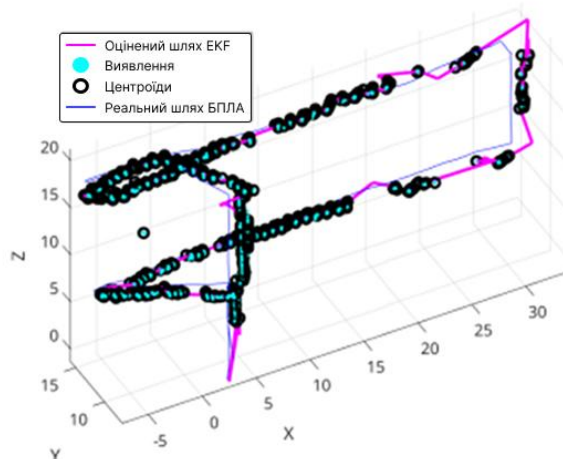


Рис. 3.16. – Відстеження траєкторії БПЛА для режиму «Swinging»

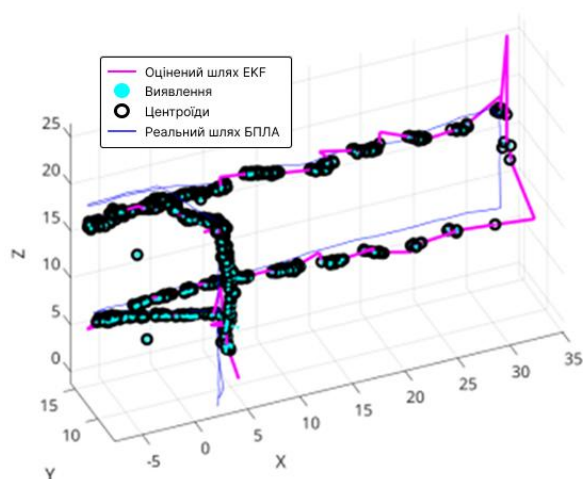


Рис. 3.17. – Відстеження траєкторії БПЛА для режиму «Slow-Down»

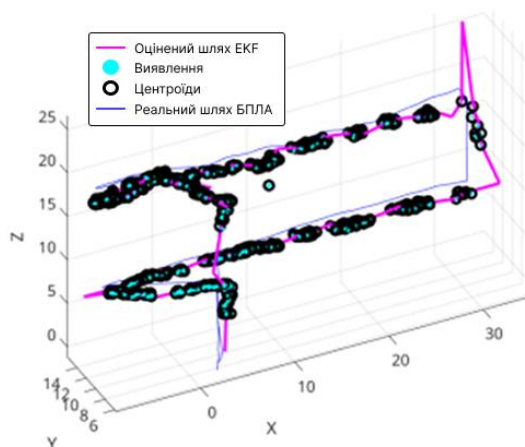


Рис. 3.18. – Відстеження траєкторії БПЛА для режиму «Stop»

Як видно з рисунків 3.16-3.18, для всіх трьох стратегій характерна підвищена щільність виявлень та центроїдів у безпосередній близькості до LiDAR, тоді як на відстанях понад ≈ 30 м кількість точок, що відповідають БПЛА, істотно зменшується. Точки виявлення та центроїди формують окремі групи, які розділені ділянками траєкторії, де БПЛА не реєструється. Це зумовлено тим, що після фіксації хоча б однієї точки від БПЛА система «звужує» сканування до обмеженого кутового сектора, відмовляючись від повного панорамного огляду. У локальній зоні кількість виявлень різко зростає, тоді як за межами відповідного сектора – падає.

Серед трьох режимів найбільшу загальну кількість реєстрацій забезпечує режим «Stop», особливо на значних відстанях від сенсора, що наочно демонструє рисунок 3.18. Це свідчить, що зупинка платформи сприяє накопиченню більшої кількості відбитих точок на далеких ділянках траєкторії. Однак з позицій точності оцінювання стану за EKF цей режим є менш сприятливим: оцінена траєкторія має виражені нерівномірності, зокрема у верхній частині, де БПЛА перебуває найдалі від LiDAR, а також спостерігається помітний пік, що свідчить про розходження фільтра через нестачу інформативних оновлень. Аналогічні тенденції фіксуються і для режиму «Slow-Down» (див. рис. 3.17).

Натомість у коливальному режимі «Swing» (див. рис. 3.16) оцінена траєкторія EKF є більш гладкою та добре узгоджується з реальною траєкторією БПЛА, що свідчить про стабільніший та надійніший процес оцінювання. Таким чином, режим зупинки максимізує кількість виявлень, але не забезпечує найкращої якості 3D-оцінки руху, тоді як коливальний режим дає більш збалансоване поєднання кількості та інформативності спостережень.

Узагальнюючи, можна зазначити, що вирішальним чинником є не стільки загальна кількість виявлень, скільки їх просторовий розподіл та внесок у зменшення невизначеності. Надмірна концентрація спостережень у локальній зоні може створювати враження високої точності лише на обмеженій ділянці траєкторії, залишаючи «сліпі» сегменти з гіршою визначеністю положення БПЛА. Натомість відносно невелика, але рівномірно розподілена кількість

виявлень уздовж усього маршруту забезпечує більш узгоджену та глобально точну 3D-оцінку траєкторії.

При цьому слід урахувати цілі проєкту, пов'язані з підвищенням ефективності відстеження БПЛА за умови пріоритетного дотримання вимог конфіденційності та безпеки людей. Поліпшення точності оцінки траєкторії дає змогу надійніше контролювати рух БПЛА, знижуючи ризики небажаного втручання чи завдання шкоди. У наступному підрозділі планується детально порівняти режим «Swinging» із базовим режимом «Sweeping», щоб показати, яким чином перший дозволяє вдосконалити другий за такими параметрами, як просторовий розподіл виявлень, точність відстеження та загальна ефективність системи щодо цілей конфіденційності та безпеки.

3.2.4. Порівняння оціненої та реальної траєкторії руху БПЛА за координатах X , Y , Z

Як було показано на рисунках 3.16-3.18, тривимірні графіки відображають просторову еволюцію положення БПЛА, однак не розкривають часової структури змін координат. Для аналізу часової динаміки на рисунках 3.19 і 3.20 подано залежності положення БПЛА від часу за осями X , Y та Z для двох методів сканування, а саме для базового «Sweeping» та коливального «Swinging». Вибір саме методу «Swinging» зумовлений тим, що, як було показано раніше, він забезпечує найточніше відтворення траєкторії та, відповідно, найвищу якість відстеження серед розглянутих стратегій.

На рисунку 3.19 наведено часові зміни координат БПЛА для режиму «Sweeping», на рисунку 3.20 – для режиму «Swinging».

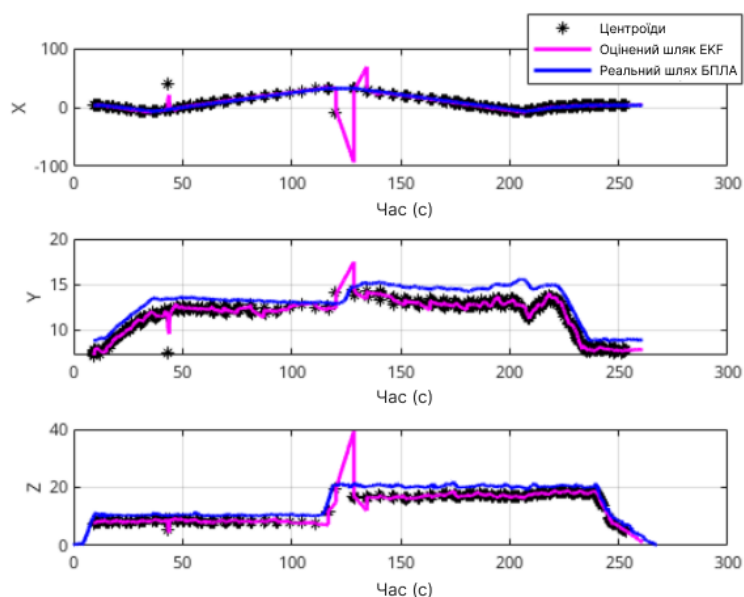


Рис. 3.19. – Часові залежності координат БПЛА в режимі «Sweeping»

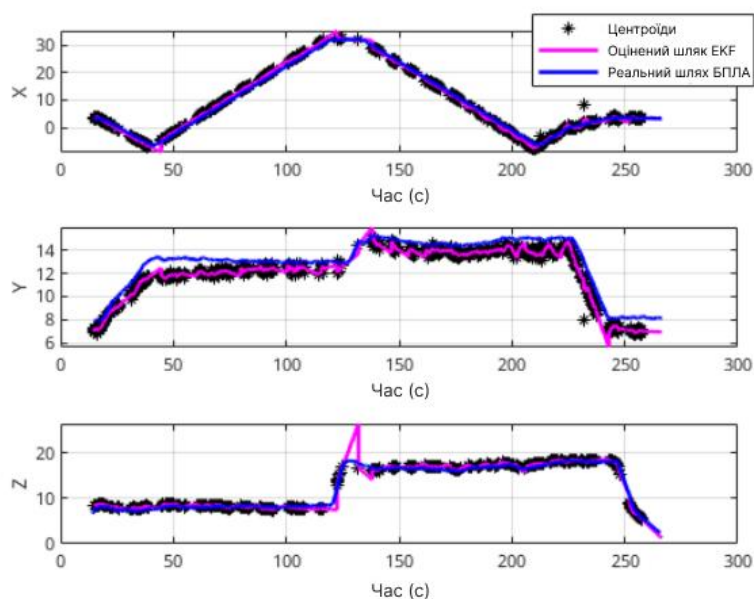


Рис. 3.20. – Часові залежності координат БПЛА в режимі «Swinging»

Порівняння перших підсюжетів кожного рисунка демонструє суттєве зростання похибки ЕКФ у випадку «Sweeping» поблизу вершини синьої кривої, що відповідає максимальній відстані до LiDAR (понад 30 м). За цих умов різко зменшується кількість виявлень, що призводить до погіршення як прогнозування, так і оновлення стану у фільтрі.

У режимі «Swinging» ситуація принципово інша. Обертання LiDAR цілеспрямовано концентрується в ділянках із підвищеною ймовірністю наявності БПЛА, що дозволяє уникнути великих розбіжностей, характерних для «Sweeping». Оцінена EKF траєкторія набагато щільніше «прилягає» до реальної кривої навіть у моменти максимальної дальності, помітно зменшуючи похибку.

Найбільші труднощі для системи традиційно пов'язані з координатою вздовж осі Y , де спостерігається стійка систематична похибка між оціненими та реальними положеннями. Це може бути зумовлено підвищеною чутливістю поперечного руху до змін кута огляду, часткових перекриттів і втрат видимості, що ускладнює стабільне отримання точних даних.

Особливо виразними є відмінності за координатою Z . Для «Sweeping» на осі Z формується чіткий максимум похибки в середині траєкторії, тобто при найбільшій відстані до сенсора, що вказує на істотне погіршення якості відстеження у вертикальному напрямку. Для «Swinging» цей максимум або зникає (для осі Y), або суттєво зменшується: для осі Z амплітуда піку знижується орієнтовно з 40 м до близько 24 м.

Отримані результати засвідчують перевагу режиму «Swinging» над базовим «Sweeping» за сумарною точністю відстеження. Коливальний режим забезпечує кращу узгодженість між оцінками EKF та реальною траєкторією, особливо на великих дистанціях, а зменшення похибок за осями Y та Z підвищує загальну надійність системи. Це, у свою чергу, сприяє досягненню цілей щодо безпечного та контрольованого моніторингу польоту БПЛА за умов дотримання вимог конфіденційності.

3.2.5. Коваріації оцінки координати x

Для детальнішої оцінки точності відновлення положення БПЛА доцільно проаналізувати еволюцію коваріації оцінок стану порівняно із реальною траєкторією. Розглядається поведінка першої компоненти вектора стану – координати x . Відповідний елемент матриці коваріації $P(1,1)$ інтерпретується як міра невизначеності в оцінці координати x : збільшення $P(1,1)$ означає зростання

невпевненості системи щодо положення БПЛА, а зменшення – підвищення достовірності оцінки.

На рисунках 3.21 та 3.22 наведено часову зміну $P(1,1)$ для базового режиму «Sweeping» та динамічного режиму «Swinging» відповідно.

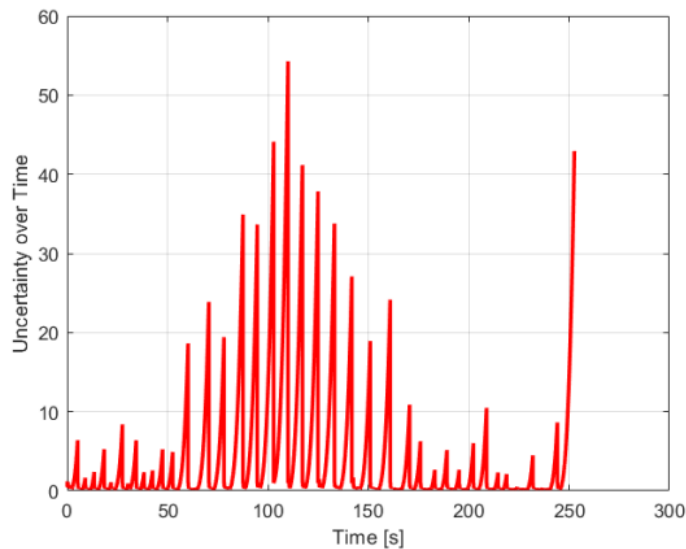


Рис. 3.21. – Зміна коваріації оцінки координати x у режимі «Sweeping»

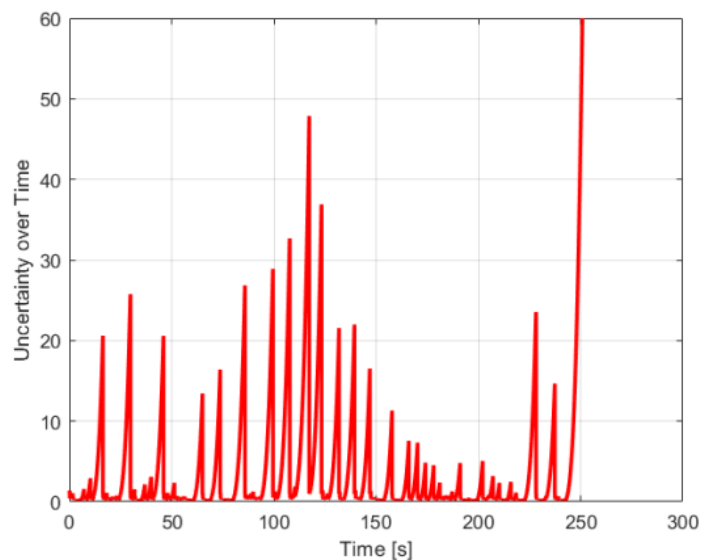


Рис. 3.22. – Зміна коваріації оцінки координати x у режимі «Swinging»

Порівняння рисунків 3.21 і 3.22 показує, що в режимі «Swinging» кількість піків коваріації менша, а їхня тривалість і щільність нижчі, ніж у випадку «Sweeping». Це є наслідком більш частих кроків оновлення EKF завдяки

цілеспрямованому фокусуванню сектора огляду LiDAR на БПЛА: регулярні корекції стану зменшують невизначеність оцінки координати x . Разом з тим для обох режимів характерна подібна фінальна ділянка з різким зростанням $P(1,1)$. Такий стрибок пояснюється тим, що під час приземлення БПЛА виходить із робочого об'єму, нові вимірювання перестають надходити, і фільтр переходить у режим чистого прогнозу. За відсутності оновлень невизначеність щодо положення зростає, що відображається як стрімкий підйом коваріації наприкінці експерименту.

3.2.6. Щільність виявлення у часі

Для оцінювання якості роботи системи доцільно проаналізувати часову динаміку щільності виявлень БПЛА, зокрема за кількістю з 16 променів LiDAR, які одночасно фіксують БПЛА. Чим більше променів реєструє об'єкт, тим вищою є достовірність як первинних вимірювань, так і подальших оцінок його руху.

На рисунках 3.23 та 3.24 подано залежність кількості променів, що виявляють БПЛА, від часу польоту.

Основна концентрація виявлень спостерігається на початку та наприкінці запису, коли БПЛА розташований поблизу LiDAR. У цей період значна частина променів потрапляє по БПЛА, формуючи високу щільність реєстрацій.

У середній частині траєкторії, зі збільшенням відстані до сенсора, число променів, що досягають БПЛА, зменшується, що призводить до помітного падіння щільності виявлень. Під час повернення в зону зльоту та посадки відстань знову скорочується, і кількість активних променів, відповідно, зростає.

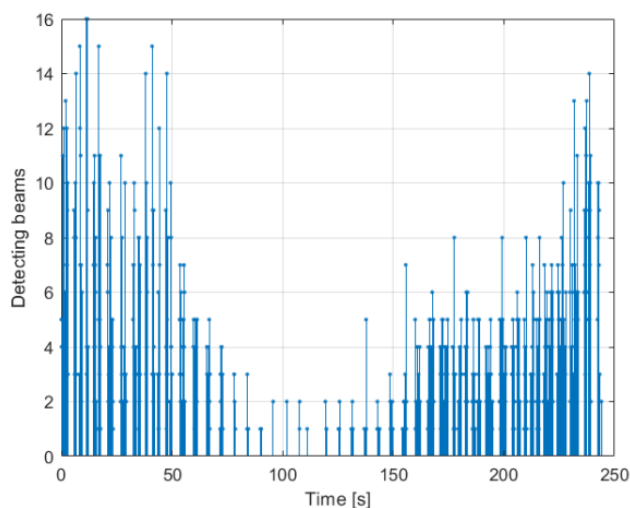


Рис. 3.23. – Часова залежність кількості променів LiDAR, що виявляють БПЛА, у режимі «Sweeping»

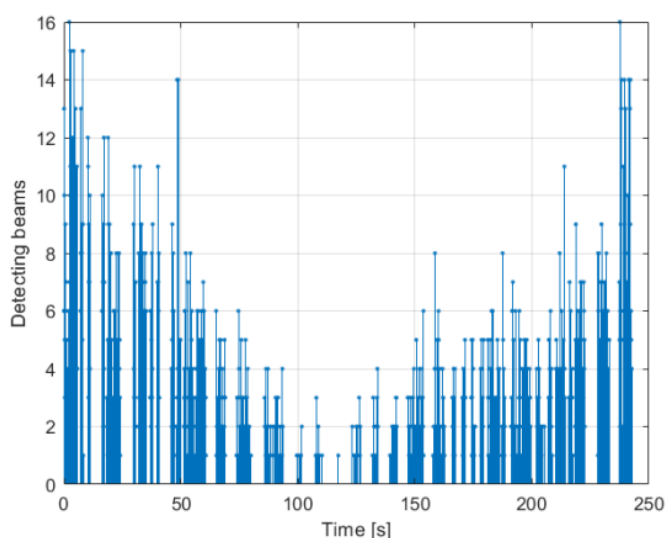


Рис. 3.24. – Часова залежність кількості променів LiDAR, що виявляють БПЛА, у режимі «Swinging»

Порівняння графіків показує, що у режимі «Swinging» щільність виявлень загалом є більшою, особливо в центральній частині траєкторії, тоді як для «Sweeping» кількість променів, що стабільно досягають БПЛА, є меншою. Більш рівномірне й інтенсивне «покриття» БПЛА променями в режимі «Swinging» забезпечує фільтру більше вимірювань для корекції стану, що безпосередньо підвищує точність і надійність відстеження траєкторії польоту БПЛА.

3.2.7. Аналітичне порівняння патернів руху системи сканування LiDAR

У попередніх підрозділах порівнювалися два з чотирьох реалізованих патернів руху. Базовим (референтним) обрано режим «Sweeping» як стандартний спосіб сканування, відносно якого оцінюється доцільність інших стратегій. Його зіставлено з рухом «Swinging», який за результатами графічного аналізу продемонстрував найкращу якість відстеження за оцінками EKF. Цей висновок підтверджується зведеними характеристиками, наведеними у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняння типів руху систем сканування LiDAR

	Режим «Sweeping»	Режим «Swinging»	Режим «Slow-Down»	Режим «Stopping»
Кількість виявлень	2564	3182	3615	4871
Час між виявленнями				
Мінімум, с	0,0717	0,0650	0,0637	0,0665
Максимум, с	8,21	6,95	7,29	10,6
Середнє, с	0,409	0,303	0,286	0,208
Похибка визначення положення	4,0406	3,4503	3,639	4,9169
Похибка визначення швидкості	0,67555	0,61006	0,62332	0,58151
Похибка 3D-оцінки, м	3,23	1,44	1,56	1,50

Зазначені значення похибки відповідають осі x і є усередненими елементами матриці коваріації $P(1,1)$. Похибка 3D-оцінки визначається за формулою 3.1 як евклідова відстань між оціненим EKF та реальним положенням БПЛА:

$$d = \sqrt{(X_{EKF} - X_{DRONE})^2 + (Y_{EKF} - Y_{DRONE})^2 + (Z_{EKF} - Z_{DRONE})^2} \quad (3.1)$$

де індекс EKF позначає координати, отримані в результаті роботи фільтра, а DRONE – координати, відновлені з журналів ArduPilot на основі GPS-вимірювань.

Аналіз таблиці 3.1 дає змогу узагальнено порівняти патерни руху за ключовими метричними показниками. Найменша похибка положення (3,4503) та мінімальна 3D-похибка (1.44 м) досягаються саме для режиму «Swinging», що свідчить про найточніше відтворення траєкторії. Похибка швидкості для цього режиму також є однією з найменших (0,61006), що вказує на стабільніші оцінки динаміки руху. Середній інтервал між виявленнями (0,303 с) забезпечує достатню частоту оновлень без надмірного обчислювального навантаження. Водночас, попри більшу кількість виявлення або менший середній інтервал між ними для патернів «Slow-Down» та «Stopping», зростання похибки положення та більші 3D-похибки вказують на меншу надійність цих режимів для високоточної реконструкції траєкторії.

Отже, режим руху «Swinging» можна вважати найбільш придатним для задач точного відстеження БПЛА за допомогою EKF. Поєднання низької похибки положення й швидкості з мінімальною 3D-похибкою робить цей патерн руху найбільш інформативним та ефективним серед усіх розглянутих режимів.

3.3. Висновок до третього розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи:

- Проведено поетапну валідацію апаратно-програмного комплексу на основі LiDAR-сенсора – від чисельного моделювання траєкторій БПЛА в середовищі MATLAB до натурних експериментів із нерухомим та рухомим RTU-сенсором.

- Досліджено вплив просторової конфігурації польоту та відстані до LiDAR на кількість виявлень, точність EKF-оцінок і поведінку коваріаційних матриць.

– Проаналізовано щільність виявлень у часі та зіставлено чотири патерни руху системи сканування («Sweeping», «Swinging», «Slow-Down», «Stopping»), на основі чого показано, що режим «Swinging» забезпечує найкращий компроміс між кількістю реєстрацій та 3D-точністю відтворення траєкторії БПЛА.

Отримані результати підтверджують працездатність запропонованої системи та ефективність адаптивного керування PTU для підвищення точності виявлення і супроводження БПЛА з використанням LiDAR-сенсора.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Організація охорони праці під час експлуатації апаратно-програмного комплексу на основі LiDAR-сенсора

Охорона праці розглядається як система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на збереження життя, здоров'я та працездатності працівників у процесі трудової діяльності [25; 27]. У контексті даної кваліфікаційної роботи це стосується, насамперед, безпечного виконання операцій із налаштування, експлуатації та обслуговування LiDAR-сенсора, поворотно-нахильної платформи, бортової апаратури БПЛА, засобів живлення (у тому числі літій-полімерних акумуляторів) та робочих місць операторів із персональними комп'ютерами.

Характеристика умов праці та основні небезпечні і шкідливі фактори.

Роботи в межах теми виконуються переважно в лабораторних умовах, а також під час польових експериментів. До основних небезпечних і шкідливих виробничих факторів належать:

- лазерне випромінювання LiDAR-сенсора;
- ураження електричним струмом при роботі з мережевими й низьковольтними колами;
- можливі механічні травми від рухомих частин поворотно-нахильної платформи та ротора БПЛА;
- небезпека загоряння або вибуху літій-полімерних (LiPo) акумуляторів;
- шкідливі фактори робочого місця оператора ПК (статичне навантаження, напруження зору, мікроклімат, шум) [27; 28; 33].

Відповідно до типових підходів з охорони праці [27], для кожної групи факторів мають бути визначені технічні, організаційні й санітарно-гігієнічні заходи захисту.

Вимоги до організації робочого місця оператора.

Робоче місце оператора, який здійснює обробку даних LiDAR-сенсора та керування системою, слід організовувати згідно з вимогами нормативної документації та типових інструкцій з роботи з ПК [27; 33]. Основні вимоги включають:

- достатнє загальне та місцеве освітлення робочої зони;
- розташування монітора на відстані 50-70 см від очей користувача, верхня межа екрана – на рівні або трохи нижче рівня очей;
- забезпечення стабільної температури (приблизно 20-24 °C) і відносної вологості повітря в межах санітарних норм;
- організацію робочого столу та крісла з урахуванням ергономічних вимог (регулювання висоти, наявність підлокітників, підніжки за потреби);
- регламентовані перерви в роботі з ПК для зниження зорового та статичного навантаження.

Такі заходи спрямовані на зменшення втоми, профілактику професійних захворювань та підвищення безпеки праці операторів [27].

Електробезпека під час роботи з апаратурою комплексу.

Електробезпека при експлуатації апаратно-програмного комплексу забезпечується дотриманням вимог законодавства, галузевих норм та правил пожежної безпеки при експлуатації електрообладнання [25; 27; 34]. Основні заходи включають:

- застосування сертифікованих блоків живлення, автоматичних вимикачів і захисних відключаючих пристроїв;
- обов'язкове заземлення металевих корпусів обладнання;
- заборону експлуатації кабелів і розеток із пошкодженою ізоляцією;
- недопущення перевантаження електромережі шляхом підключення великої кількості пристроїв до одного подовжувача;
- розміщення комутаційної апаратури в зоні легкого доступу для швидкого вимкнення у разі аварійної ситуації;

– проходження персоналом первинного та періодичного інструктажу з електробезпеки, а також перевірки знань відповідних інструкцій [27; 32; 34].

Додатково рекомендовано застосовувати діелектричні килимки біля щитків і пультів керування, а також чітко позначати вимикачі аварійного відключення живлення.

Безпека при роботі з LiDAR-сенсором та лазерним випромінюванням.

Більшість сучасних LiDAR-сенсорів, що використовуються для навігації й виявлення цілей, відносяться до класів лазерної безпеки з обмеженим рівнем небезпеки (клас 1 або клас 1M). Проте навіть у цьому випадку має бути забезпечено виконання загальних вимог до лазерної безпеки, сформульованих у спеціалізованій літературі та інструкціях [29-30]. До таких вимог належать:

– заборона прямого спостереження джерела випромінювання через оптичні прилади (телескоп, бінокль, фотооб'єктив), навіть якщо лазер відноситься до «безпечного» класу;

– розміщення LiDAR-сенсора таким чином, щоб основний пучок випромінювання проходив вище рівня очей людей, що перебувають поблизу;

– маркування небезпечних зон відповідними попереджувальними знаками;

– обмеження доступу сторонніх осіб до зони випробувань;

– допуск до робіт лише персоналу, який пройшов спеціальне навчання та інструктаж з лазерної безпеки, а для більш потужних установок – забезпечення персоналу захисними окулярами із відповідним спектральним фільтром [29-30].

При налаштуванні LiDAR-сенсора в приміщенні слід використовувати екрануючі поверхні або поглиначі випромінювання, що запобігають небажаному відбиттю лазерного променя, а також контролювати стан оптичних вікон і корпусу сенсора для виключення неконтрольованих витоків випромінювання [30].

Безпечна експлуатація літій-полімерних акумуляторів БПЛА.

Літій-полімерні (LiPo) акумулятори, що застосовуються для живлення БПЛА, є потенційним джерелом підвищеної пожежної небезпеки через ризик

перегріву, короткого замикання та термічного розгону. Спеціалізовані інструкції з експлуатації LiPo передбачають низку обов'язкових вимог [31]:

- заряджання акумуляторів лише штатними або сертифікованими зарядними пристроями з балансуванням комірок;
- заборона перезаряджання (напруга понад 4,2 В на елемент) і глибокого розряджання (нижче 3,0-3,3 В на елемент) [31];
- постійний візуальний контроль процесу заряджання, недопущення його без нагляду;
- розміщення акумуляторів під час заряджання на негорючій поверхні (металева коробка, керамічна плитка) та, за можливості, у спеціальних вогнестійких сумках;
- негайне виведення з експлуатації пошкоджених, здутих або перегрітих акумуляторів з подальшою утилізацією згідно з рекомендаціями виробника;
- зберігання акумуляторів у режимі «storage» (приблизно 3,8-3,85 В на елемент) при тривалих перервах у роботі, у сухому прохолодному приміщенні [31].

При роботі з БПЛА в приміщенні або на полігоні слід передбачати наявність засобів первинного пожежогасіння (вуглекислотних або порошкових вогнегасників) і забезпечити безпечну дистанцію між місцем заряджання акумуляторів, робочими місцями персоналу та легкозаймистими матеріалами [27; 34].

Організаційні заходи з охорони праці.

Організаційні заходи включають:

- проведення вступного, первинного, повторного та позапланового інструктажів з охорони праці з реєстрацією в установленому порядку [25; 27];
- розроблення і затвердження інструкцій з охорони праці для робіт з LiDAR-сенсором, БПЛА, LiPo-акумуляторами та комп'ютерним обладнанням [27; 33];

- призначення відповідальних осіб за електрогосподарство, пожежну безпеку та експлуатацію лазерного обладнання;
- періодичне навчання персоналу з питань надання першої домедичної допомоги та дій у разі аварії або пожежі;
- проведення планових перевірок стану електромережі, засобів пожежогасіння, вентиляції, заземлення та справності захисних засобів [27; 34].

Реалізація зазначених заходів забезпечує відповідність умов праці вимогам чинного законодавства та знижує ризики виробничого травматизму.

4.2. Забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях при експлуатації системи виявлення і супроводження БПЛА

Безпека в надзвичайних ситуаціях у рамках даної роботи розглядається відповідно до положень Кодексу цивільного захисту України, який регулює відносини щодо захисту населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій техногенного, природного та іншого характеру [26; 28].

Можливі сценарії надзвичайних ситуацій.

Для апаратно-програмного комплексу, що включає LiDAR-сенсор, поворотно-нахильну платформу, бортове обладнання БПЛА та електроживлення, найбільш імовірними надзвичайними ситуаціями є:

- пожежа в приміщенні лабораторії або на полігоні внаслідок короткого замикання в електромережі, перегріву обладнання чи загоряння LiPo-акумуляторів;
- вибухоподібне загоряння акумуляторів у разі механічного пошкодження чи неправильного заряджання;
- травмування персоналу при неконтрольованому запуску або падінні БПЛА;
- ушкодження очей або шкіри при порушенні правил лазерної безпеки;

– наслідки небезпечних метеорологічних явищ (гроза, шквальний вітер) під час польових випробувань [28; 31; 34].

Кожен із перелічених сценаріїв вимагає розроблення превентивних заходів та алгоритмів дій персоналу.

Превентивні заходи щодо запобігання надзвичайним ситуаціям.

Система запобігання надзвичайним ситуаціям базується на сукупності організаційних, технічних і режимних заходів [26; 28]. Основні напрями включають:

1. Пожежна безпека приміщень і полігонів:

- дотримання вимог нормативних документів щодо проєктування й експлуатації електромереж і електроустановок;
- використання кабелів та апаратури з відповідною категорією пожежної безпеки;
- заборона зберігання легкозаймистих матеріалів у безпосередній близькості до LiPo-акумуляторів, зарядних пристроїв і лабораторних стендів;
- оснащення приміщень первинними засобами пожежогасіння (вуглекислотні та порошкові вогнегасники) з розрахунку, передбаченого нормативами [27; 34].

2. Безпечна організація польотів БПЛА:

- встановлення безпечного периметра зони польотів, заборона перебування осіб без засобів захисту в межах небезпечної зони;
- заборона польотів над скупченням людей, будівлями та об'єктами критичної інфраструктури;
- проведення передпольотного огляду БПЛА (стан пропелерів, кріплень, акумуляторів, каналів зв'язку) та контроль метеорологічних умов;
- налаштування функцій аварійного завершення польоту (режим «Return-to-Home», геозони) із метою мінімізації наслідків втрати керування [28].

3. Попередження аварій з LiPo-акумуляторами:

- дотримання інструкцій щодо заряджання, розряджання та зберігання, наведених у спеціалізованих рекомендаціях [31];
- використання індивідуальних вогнестійких контейнерів або сумок безпеки під час заряджання і транспортування акумуляторів;
- негайне винесення на відкрите безпечне місце акумулятора, що почав роздуватися, диміти або нагріватися.

4. Організаційні заходи цивільного захисту:

- розроблення й затвердження плану дій персоналу у надзвичайних ситуаціях (пожежа, вибух, травмування, раптове погіршення метеоумов);
- інформування співробітників про розташування евакуаційних виходів, вогнегасників, щитів з пожежним інвентарем;
- проведення періодичних тренувань (навчальних евакуацій) відповідно до рекомендацій з безпеки життєдіяльності та цивільного захисту [28].

Алгоритм дій персоналу в разі надзвичайної ситуації.

Відповідно до вимог законодавства у сфері цивільного захисту [26] та методичних рекомендацій з безпеки життєдіяльності [28], у разі виникнення надзвичайної ситуації персонал має діяти за попередньо розробленими алгоритмами.

1. У разі пожежі або загоряння LiPo-акумуляторів:

- негайно припинити виконання робіт, знеструмити апаратно-програмний комплекс (вимкнути головний вимикач, від'єднати зарядні пристрої від мережі);
- оцінити масштаб пожежі: за можливості локалізувати загоряння первинними засобами пожежогасіння (вуглекислотний або порошковий вогнегасник), не використовуючи воду для гасіння електроустановок і LiPo-акумуляторів [34];
- повідомити за телефоном «101» до чергових підрозділів ДСНС із зазначенням адреси, характеру пожежі та наявних небезпек;

- організувати евакуацію людей за найкоротшими евакуаційними шляхами із закриттям дверей для обмеження поширення диму й вогню.

2. У разі травмування співробітника (порізи, удари, ураження електричним струмом, пошкодження очей):

- негайно зупинити роботу обладнання та БПЛА, за потреби – знеструмити установку;

- усунути дію небезпечного фактора (віддалити потерпілого від джерела струму, заблокувати рухомі елементи, відвести БПЛА від людей);

- надати потерпілому першу домедичну допомогу згідно з чинними рекомендаціями;

- викликати екстрену медичну допомогу за телефоном «103» і повідомити адміністрацію підрозділу;

- забезпечити супровід потерпілого до медичного закладу та оформити необхідну документацію з розслідування нещасного випадку [27-28].

- У разі раптового погіршення метеорологічних умов під час польових експериментів (гроза, сильний вітер):

- припинити політ БПЛА з використанням штатних функцій завершення місії або повернення на стартову точку;

- знеструмити наземне обладнання, за можливості – оперативно демонтувати LiDAR-сенсор і повернути його в приміщення;

- вивести персонал із потенційно небезпечних зон (відкриті майданчики, височини, місця поблизу металевих опор).

Реалізація зазначених організаційно-технічних заходів дозволяє знизити ймовірність виникнення надзвичайних ситуацій та обмежити їх наслідки, забезпечуючи безпечну експлуатацію системи виявлення і супроводження БПЛА з використанням LiDAR-сенсора відповідно до вимог чинного законодавства України у сфері охорони праці та цивільного захисту [25-26].

4.3. Висновок до четвертого розділу

У цьому розділі розглянуто правові, організаційні та технічні заходи щодо забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації апаратно-програмного комплексу для виявлення і супроводження БПЛА з використанням LiDAR-сенсора, а також заходи з мінімізації наслідків можливих надзвичайних ситуацій, пов'язаних з роботою комплексу. Система управління охороною праці та цивільним захистом ґрунтується на вимогах Закону України «Про охорону праці» та Кодексу цивільного захисту України, а також на положеннях профільних навчальних посібників з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі освітнього рівня «Магістр» розв'язано задачу оптимізації відстеження і супроводження БПЛА із використанням LiDAR-сенсора та досліджено ефективність чотирьох патернів просторового руху системи сканування, а саме режимів «Sweeping», «Swinging», «Slow-Down» та «Stopping». Доведено, що режим «Swinging» забезпечує найвищу точність оцінки стану за EKF, тоді як режим «Stopping» дає найбільшу кількість зареєстрованих виявлень БПЛА.

Із урахуванням цільового призначення системи – підвищення якості відстеження і супроводження БПЛА за умови дотримання вимог безпеки та конфіденційності – пріоритетним є режим «Swinging». Фокусування сектору сканування LiDAR в околі БПЛА підвищує щільність виявлень у релевантній зоні, зменшує похибку оціненого положення та покращує точність траєкторного супроводу БПЛА, що сприяє зниженню ризиків порушення приватності та небезпечних ситуацій.

Використання поворотно-нахильної платформи PTU-E46 забезпечує адаптивне керування напрямком огляду сенсора та утримання БПЛА в полі зору, а ROS-орієнтована архітектура з вузлами «Фільтр», «Контролер» та «Розширений фільтр Калмана» гарантує узгоджену обробку хмар точок LiDAR.

Важливим результатом є продемонстрований внесок EKF: послідовне уточнення оцінок центроїдів зменшує похибку у часі, а польові експерименти підтвердили достатню точність та надійність відстеження траєкторії БПЛА в реальних умовах експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Abir T. A., et al. Towards Robust Lidar-based 3D Detection and Tracking of UAVs // Proceedings of the Ninth Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications (DroNet '23). – Helsinki: Association for Computing Machinery, 2023. – P. 1–7.
- 2 Bartsch D.-U., Muftuoglu I. K., Freeman W. R. Laser pointers revisited, 2016. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4993644/>.
- 3 Di Pietro R., Oligeri G., Tedeschi P. Jam-me: Exploiting jamming to accomplish drone mission // 2019 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS). – IEEE, 2019. – P. 1–9.
- 4 Dogru S., Marques L. Drone Detection Using Sparse Lidar Measurements // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2022. – Vol. 7, No. 2. – P. 3062–3069.
- 5 Dogru S., Marques L. Pursuing Drones With Drones Using Millimeter Wave Radar // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2020. – Vol. 5, No. 3. – P. 4156–4163.
- 6 Du W., Beltrame G. LiDAR-based Real-Time Object Detection and Tracking in Dynamic Environments // arXiv preprint arXiv:2407.04115. – 2024. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2407.04115>.
- 7 Ho K. E. Efficacy in Low-Cost Kinetic Apprehension Counter Drone System: PhD thesis. – Purdue University Graduate School, 2024.
- 8 Jarvis J. C., Babcock W. A. The ethical debate of drone journalism: flying into the future of reporting // Research Papers. – 2014. – No. 475.
- 9 Jha U. C. Drone Wars: Ethical, Legal and Strategic Implications: Ethical, Legal and Strategic Implications. – New Delhi: KW Publishers Pvt Ltd, 2014.
- 10 Kim S.-G., et al. Review of intentional electromagnetic interference on UAV sensor modules and experimental study // Sensors. – 2022. – Vol. 22, No. 6. – P. 2384.
- 11 Liang C., et al. UAV Detection Using Continuous Wave Radar // 2018 IEEE International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP). – 2018. – P. 1–5.

- 12 Lykou G., Moustakas D., Gritzalis D. Defending airports from UAS: A survey on cyber-attacks and counter-drone sensing technologies // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, No. 12. – P. 3537.
- 13 Mohamed I. S. Detection and tracking of pallets using a laser rangefinder and machine learning techniques: PhD thesis. – European Master on Advanced Robotics+ (EMARO+), University of Genova, Italy, 2017.
- 14 Oğuz S., et al. An Open-Source UAV Platform for Swarm Robotics Research: Using Cooperative Sensor Fusion for Inter-Robot Tracking // *IEEE Access*. – 2024. – Vol. 12. – P. 43378–43395.
- 15 Ohlenbusch M., et al. Robust Drone Detection for Acoustic Monitoring Applications // 2020 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). – 2021. – P. 6–10.
- 16 Quentel A. A scanning LiDAR for long range detection and tracking of UAVs: Theses. – Normandie Université, 2021.
- 17 Rathika P. D., Jaya Suriya B. G., et al. Review on Anti-Drone Techniques // *NVEO – Natural Volatiles & Essential Oils Journal*. – 2021. – P. 3498–3508.
- 18 Robbe C., Papy A., Nsiampa N. Using Kinetic Energy Non-Lethal Weapons to Neutralize Low Small Slow Unmanned Aerial Vehicles // *Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety*. – 2018. – Vol. 2. – P. 1–15.
- 19 Simon O., Gotthans T. A survey on the use of deep learning techniques for UAV jamming and deception // *Electronics*. – 2022. – Vol. 11, No. 19. – P. 3025.
- 20 Tewes J. Lasers, jammers, nets, and eagles: Drone defense is still illegal // *SSRN Electronic Journal*. – 2017. – Available at SSRN 3304914.
- 21 Wilson A. N., et al. Embedded sensors, communication technologies, computing platforms and machine learning for UAVs: A review // *IEEE Sensors Journal*. – 2022. – Vol. 22, No. 3. – P. 1807–1826.
- 22 Zhang Y., Hou J., Yuan Y. A comprehensive study of the robustness for lidar-based 3D object detectors against adversarial attacks // *International Journal of Computer Vision*. – 2024. – Vol. 132, No. 5. – P. 1592–1624.

23 Zhao Z., et al. Efficient and adaptive lidar–visual–inertial odometry for agricultural unmanned ground vehicle // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2022. – Vol. 19, No. 2. – Art. 17298806221094925.

24 Zhu F., et al. Decentralized lidar-inertial swarm odometry // arXiv preprint arXiv:2209.06628. – 2022.

25 Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12> (дата звернення: 29.11.2025).

26 Кодекс цивільного захисту України : Кодекс України; Закон, Кодекс від 02.10.2012 № 5403-VI // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/5403-17> (дата звернення: 29.11.2025).

27 Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. – Львів : Афіша, 2002. – 250 с.

28 Безпека життєдіяльності та цивільний захист : підручник для студ. спеціальностей з природничих, соціально-гуманітарних наук та інженерно-комунікаційних технологій / О. Г. Левченко, О. В. Землянська, Н. А. Праховнік, В. В. Зацарний ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл : 10,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 267 с.

29 Дембіцька С. В. Вимоги безпеки під час роботи з лазерами [Електронний ресурс] // Матеріали наук.-техн. конф. Вінницького національного технічного університету. – 2016. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2016/paper/download/867/476> (дата звернення: 29.11.2025).

30 Лазерні апарати: правила безпечної експлуатації [Електронний ресурс] // Медична платформа. – 2017. – Режим доступу: <https://medplatforma.com.ua/article/891-lazern-apatati-pravila-bezpechno-ekspluatats> (дата звернення: 29.11.2025).

31 Інструкція з експлуатації літій-полімерних (LiPo) акумуляторів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://flymod.net/page/instruction_for_lipo_battery (дата звернення: 29.11.2025).

32 Правила безпеки при користуванні електроприладами [Електронний ресурс] // Офіційний сайт органів місцевого самоврядування. – Режим доступу: <https://smr.gov.ua/> (розд. «Правила безпеки при користуванні електроприладами») (дата звернення: 29.11.2025).

33 Інструкція з охорони праці, техніки безпеки, пожежної безпеки та охорони навколишнього середовища під час роботи з ПК [Електронний ресурс] // Територіальне управління Державної судової адміністрації України в Івано-Франківській області. – Режим доступу: <https://rt.if.court.gov.ua/sud0912/inshe/4/30> (дата звернення: 29.11.2025).

34 Правила пожежної безпеки при експлуатації електрообладнання [Електронний ресурс] // Навчально-методичний центр цивільного захисту та безпеки життєдіяльності Закарпатської області. – 2019. – Режим доступу: <https://nmc.dsns.gov.ua/zk/news/ostanni-novini/100> (дата звернення: 29.11.2025).

35 Химич Г. П. Мобільні малі антидронові системи. технології проєктування / Г. П. Химич, В. Л. Дунець, М. Блавіцький // Матеріали IV Міжнародної наукової конференції «Воєнні конфлікти та техногенні катастрофи: історичні та психологічні наслідки» (Тернопіль, 18–19 квіт. 2024 р.). – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С. 140–144. – Режим доступу: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44811> (дата звернення: 29.11.2025).

36 Гевко І. Б. Дрон з імпульсним квантовим генератором для знешкодження об'єктів ураження / І. Б. Гевко, В. Л. Дунець, Ю. Б. Паляниця, А. С. Марценюк, Г. П. Химич // Матеріали IV Міжнародної наукової конференції «Воєнні конфлікти та техногенні катастрофи: історичні та психологічні наслідки» (Тернопіль, 18–19 квіт. 2024 р.). – Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2024. – С. 125–127. – Режим доступу: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44803> (дата звернення: 29.11.2025).

37 Паляниця Ю. Дрон з блоком надвисоких частот для виявлення та знешкодження вибухових пристроїв та мін / Ю. Паляниця, А. Марценюк, В. Дунець, В. Бучинський, М. Паламар // Збірник тез III Міжнародної наукової конференції «Воєнні конфлікти та техногенні катастрофи: історичні та

психологічні наслідки» (Тернопіль, 20–21 квіт. 2023 р.). – Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 158–159. – Режим доступу: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41121> (дата звернення: 29.11.2025).

38 Чикета В.О., Дунець В.Л. Адаптивні стратегії руху в LiDAR-системі для покращення виявлення та відстеження БПЛА. Збірник тез доповідей XIV Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль 11-12 грудня 2025 року). Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025. с. 367-368.

ДОДАТКИ

Додаток А

Теза конференції

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Маріборський університет (Словенія)
Технічний університет у Кошице (Словаччина)
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)
Краківський економічний університет (Польща)
Вроцлавський економічний університет (Польща)
Університет «Опольська Політехніка» (Польща)
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Вінницький національний аграрний університет
Львівський національний університет ім. І. Франка
Головне управління Пенсійного фонду в Тернопільській області
Наукове товариство ім. Шевченка
Тернопільський обласний комунальний інститут післядипломної педагогічної освіти
Сумський державний педагогічний університет
Запорізький національний університет

**АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ
СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Збірник

тез доповідей

**XIV Міжнародної науково-технічної
конференції молодих учених та студентів
11-12 грудня 2025 року**



**УКРАЇНА
ТЕРНОПІЛЬ – 2025**

75.	В.Стецько, М. Приймак, Р. Жаровський МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ РОБОТИЗОВАНОЇ ГАЗОНОКОСАРКИ		349
76.	Д.П. Стухляк, Д.М. Ярошук РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВОЛОКНА ЗА ЗОБРАЖЕННЯМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО АНАЛІЗУ		351
77.	П.Д. Стухляк, А.О. Петров РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СКЛАДАННЯ КОНТАКТНОГО РОЗ'ЄМУ PIN HEADER		353
78.	О.І. Суховий ВИКОРИСТАННЯ АНСАМБЛЮ НЕЙРОМЕРЕЖ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ РОЗМІТКИ ДАНИХ ДЛЯ НАВЧАННЯ		355
79.	А. Такварелі, Ю. Лещишин ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРНИХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА І СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ		357
80.	А.М.Фаберський СТЕГАНОГРАФІЯ ЗОБРАЖЕНЬ		358
81.	В.Я. Фриз, Р.Б. Трембач, В.В. Левицький АЛГОРИТМ СЦЕНАРНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ПРИГОТУВАННЯ ПИВА		359
82.	С.Б. Фундигус ОПТИМІЗАЦІЯ СЕГМЕНТАЦІЇ КОРОЗІЙНИХ ЗОН НА ФЛАНЦЕВИХ З'ЄДНАННЯХ ТРУБОПРОВІДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДИФІКОВАНОЇ АРХІТЕКТУРИ U-NET З АДАПТИВНИМ МЕХАНІЗМОМ УВАГИ		361
83.	Г.П. Химич, О.М. Опашний, Р.І. Кондра ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВІДНИХ НВЧ СТРУКТУР З НЕОДНОРІДНОСТЯМИ У ХВИЛЕВОДАХ		362
84.	О.В. Цвірла, І. В. Мудрий, Н. С. Луцки ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ВИЯВЛЕННЯ ВРАЗЛИВИХ ХЕШ-СТРІЧОК У КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ		364
85.	І. М. Чепіль, В.Д. Тимошук МОДЕЛЬ НАДАННЯ МЕРЕЖЕВИХ СЕРВІСІВ У SDN З ПІДТРИМКОЮ BRING YOUR OWN CONTROL		365
86.	В.О. Чикета, В.Л. Дунець АДАПТИВНІ СТРАТЕГІЇ РУХУ В LiDAR-СИСТЕМІ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДСТЕЖЕННЯ БПЛА		367
87.	Т.О. Члек АДАПТИВНІ ФІЛЬТРИ ТА НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ВИДІЛЕННЯ КОРИСНОГО СИГНАЛУ З ШУМУ В РАДІОКАНАЛАХ		369
88.	Я.М. Чорний ПРИНЦИПИ РОБОТИ АЛГОРИТМУ PROOF OF RANK		370
89.	Р.І. Шмирко ТЕХНОЛОГІЯ Li-Fi: ПЕРЕДАЧА ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ СВІТЛА		373
90.	Д.А. Шупа НЕЙРОІНТЕРФЕЙСИ ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ		374

УДК 621.391

В.О. Чикета; В.Л. Дунець, канд. техн. наук, доц.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

АДАПТИВНІ СТРАТЕГІЇ РУХУ В LiDAR-СИСТЕМІ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДСТЕЖЕННЯ БПЛА

V.O. Chyketa; V.L. Dunets Ph.D., Assoc. Prof.

ADAPTIVE MOTION STRATEGIES IN LiDAR SYSTEM FOR IMPROVED UAV DETECTION AND TRACKING

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) все ширше застосовуються у цивільній та військовій сферах, що породжує нові виклики безпеки. Зокрема, зловмисне використання БПЛА становить загрози приватності та суспільній безпеці, тому задача їх своєчасного виявлення є вкрай актуальною. Існує багато підходів до виявлення БПЛА – радіолокаційні та акустичні системи, оптичні камери, радіочастотний моніторинг,

тощо [1]. В цьому контексті перспективним є використання активних лазерних сенсорів LiDAR, які здатні забезпечувати високу точність виявлення БПЛА на дальності до кількох сотень метрів [2]. LiDAR (Light Detection and Ranging) – це метод дистанційного зондування, який використовує світло у формі імпульсного лазера для вимірювання змінної відстані до об'єкта або поверхні. На відміну від камер, LiDAR не залежить від освітлення і може точно визначати відстань до цілі [2]. Проте типовий LiDAR забезпечує обмежену роздільну здатність, ускладнюючи ідентифікацію типу об'єкта [1, 2]. Таким чином, для ефективного «протидронового» захисту доцільно поєднувати

кілька сенсорів [1]. Тому виникає потреба зосередити увагу на вдосконаленні системи виявлення та відстеження БПЛА на основі LiDAR через оптимізацію стратегії руху сенсора.

Метою такого дослідження є підвищення точності та надійності виявлення та супроводу БПЛА шляхом використання LiDAR, встановленого на панорамній платформі, з адаптивними алгоритмами керування його скануванням. Для досягнення цієї мети було реалізовано LiDAR-орієнтовану систему виявлення з розширеними стратегіями руху. Зокрема, розроблено чотири режими сканування лазерного далекоміра: широке оглядове сканування, маятникове (коливальне) сканування навколо цілі, уповільнення обертання та зупинка сенсора. Застосування цих режимів дозволяє збільшити кількість кадрів LiDAR, що захоплюють БПЛА, і тим самим підвищити точність оцінювання траєкторії. Управління рухом платформи реалізовано за допомогою модулів на Robot Operating System (ROS), які отримують дані від LiDAR та динамічно змінюють напрямок і швидкість сканування. Для обробки даних використовуються методи машинного навчання: зокрема, CNN для аналізу хмар точок та класифікації цілей. Додатково впроваджено елементи сенсорної інтеграції – поєднання лідарних даних з показами оптичних камер та акустичних сенсорів – з метою підвищення достовірності виявлення в різноманітних умовах. Таким чином, запропонована методологія поєднує адаптивне керування сенсором та інтелектуальну обробку даних для ефективного відстеження БПЛА у реальному часі.

Основні результати. Розроблену систему протестовано в умовах наближених до реальних: здійснювалося відстеження БПЛА, що рухається, з використанням різних патернів сканування LiDAR. Аналіз ефективності показав, що серед випробуваних стратегій два режими забезпечують найкращі показники. Перший – маятникове

сканування («swinging»), при якому платформа безперервно коливає LiDAR навколо положення цілі. Ця стратегія виявилася найбільш ефективною з точки зору точності оцінки положення БПЛА: оцінки, отримані за допомогою розширеного фільтра Калмана (EKF), максимально наближені до реальної траєкторії польоту [3]. Зокрема, при маятниковому режимі вдалося уникнути значного накопичення похибки навіть коли БПЛА віддалявся на граничну відстань (~30 м), тоді як при широкому оглядовому скануванні спостерігалось істотне зростання помилки EKF на максимальних дистанціях [4, 5]. Другий результативний режим – зупинка сканування («stopping»), який полягає у тимчасовій зупинці повороту LiDAR для накопичення більшої кількості точкових хмар цілі. Ця стратегія дозволяє максимізувати число виявлення БПЛА за одиницю часу, що підвищує ймовірність захоплення швидкісних або маневрових цілей. Виявлено, що маятникова стратегія забезпечує найкращий баланс між частотою сканування і точністю відстеження цілі. Фокусування лазерного променя в області навколо БПЛА приводить до підвищення точності супроводу та зменшення невизначеності в оцінці координат. Використання поворотної платформи (PTU-E46) дало змогу реалізувати таке адаптивне сканування і утримувати БПЛА у полі зору сенсора протягом всього польоту. Розроблена ROS-архітектура забезпечила узгоджену роботу модулів виявлення, кластеризації та фільтрації даних, що покращило загальну продуктивність системи при відстеженні БПЛА в режимі реального часу. Отримані експериментальні дані підтверджують, що впровадження адаптивних рухових стратегій суттєво покращує показники трекінгу цілі: фільтр Калмана ефективніше знижує невизначеність оцінок траєкторії, постійно уточнюючи положення БПЛА на основі нових вимірювань. Під час польових випробувань встановлено, що система працює точно та надійно в реальних умовах, перевершуючи базові підходи зі статичним скануванням за здатністю своєчасно виявляти і стійко супроводжувати ціль.

Висновок. Проведене дослідження продемонструвало ефективність використання адаптивних рухових стратегій для LiDAR-системи виявлення БПЛА. Зокрема, встановлено, що маятниковий режим сканування сенсора забезпечує мінімальну похибку оцінювання траєкторії БПЛА завдяки концентрації вимірювань у зоні цілі. Визначено, що режим зупинки сканування дозволяє максимізувати кількість виявлення, що є корисним для фіксації швидкісних цілей. Аргументовано, що поєднання цих стратегій із реєстрацією даних у режимі реального часу та фільтрацією (EKF) підвищує точність і надійність супроводу БПЛА. Розроблена система на основі поворотної платформи LiDAR, інтегрована в ROS, показала високу ефективність під час експериментів, що відкриває можливості для її практичного застосування у сфері захисту від несанкціонованих БПЛА. Подальший розвиток роботи може включати динамічні стратегії руху, що автоматично підлаштовуються під умови польоту БПЛА, та глибшу інтеграцію методів штучного інтелекту для прогнозування поведінки цілей.

Література

1. Lykou, G., Moustakas, D., & Gritzalis, D. (2020). Defending Airports from UAS: A Survey on Cyber-Attacks and Counter-Drone Sensing Technologies. *Sensors*, 20(12), 3537. <https://doi.org/10.3390/s20123537>.
2. Dogru S., Marques L. Drone Detection Using Sparse Lidar Measurements // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2022. – Vol. 7, No. 2. – P. 3062–3069. – DOI: 10.1109/LRA.2022.3145498.
3. Alain Quentel. A scanning LiDAR for long range detection and tracking of UAVs. *Electronics*. Normandie Université, 2021.
4. Du, W., & Beltrame, G. (2024). LiDAR-based Real-Time Object Detection and Tracking in Dynamic Environments. *arXiv preprint arXiv:2407.04115*.