

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗПЛОТНИХ СИСТЕМ

(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,  
групи МТЮЛС-21-1

Максим МАЦ

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія  
оптоінформаційних та лазерних систем»

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ

(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Фізичних основ електронної техніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

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

Тип програми освітньо-професійна

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві Мацу Максиму Євгеновичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Лазерні технології безпілотних систем

затверджена наказом університету від « 23 » травня 2025 р. № 408 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 23 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Фізико-математичні основи лазерної далекометрії

2. Лазерний далекомір 3. Вимірювання відстаней.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 1 Теорія лазерної далекометрії у фізиці та математиці. 2 Практична реалізація безпілотних систем. 3 Застосування в безпілотних системах.

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

Демонстраційний матеріал – 14 слайдів

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи (проекту)   | Термін виконання етапів роботи (проекту) | Примітка |
|---|---|--|----------|
| 1 | Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про основи лазерної далекометрії | 05.05.25–14.05.25                        | Виконано |
| 2 | Аналізування фізико-математичних основ та конструкції лазерного далекоміра                  | 15.05.25–21.05.25                        | Виконано |
| 3 | Приклади реалізації у безпілотних системах  | 22.05.25–26.05.25                        | Виконано |
| 4 | Застосування в безпілотних системах   | 27.05.25–29.05.25                        | Виконано |
| 5 | Оформлення пояснювальної записки  | 30.05.25–10.06.25                        | Виконано |
| 6 | Оформлення демонстраційного матеріалу   | 11.06.25–13.06.25                        | Виконано |
| 7 | Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат                               | 14.06.25–19.06.25                        | Виконано |
| 8 | Отримання відгуку та рецензії   | 20.06.25–21.06.25                        | Виконано |
| 9 | Підготовка та захист кваліфікаційної роботи   | 22.06.25–25.06.25                        | Виконано |

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ  
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 52 с., 20 рис., 1 табл.,  
1 додаток, 10 джерел.

БЕЗПІЛОТНІ СИСТЕМИ, ІМПУЛЬСНИЙ ДАЛЕКОМІР, ЛАЗЕРНА  
ДАЛЕКОМЕТРІЯ, РІВНЯННЯ ДАЛЕКОМЕТРІЇ, ФАЗОВИЙ ДАЛЕКОМІР,

Об'єкт дослідження – Лазерні технології безпілотних систем.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження фізичних основ, конструкцій, експлуатаційних характеристик, а також тенденції розвитку лазерних технологій безпілотних систем.

Метод дослідження – теоретичний.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні завдання.

1. Дослідити фізичні та математичні основи лазерної далекометрії.
2. Проаналізувати практичне використання методів далекометрії.
3. Дослідити питання використання лазерної далекометрії в безпілотних системах.

## **ABSTRACT**

Explanatory note of the qualification work: 52 pp., 20 figures, 1 tables, 1 appendice, 10 sources.

**IMPULSE RANGE METER, LASER RANGEFINDING, PHASE-BASED RANGEFINDER, RANGEFINDING EQUATION, UNMANNED SYSTEMS.**

The object of research is Laser technologies of unmanned systems.

The method of qualification work is the study of the physical foundations, structures, operational characteristics, as well as the development trends of unmanned systems.

The research method is theoretical.

To achieve the goal, the following tasks were set and solved.

1. To study the physical and mathematical foundations of laser rangefinding.
2. To analyze the practical use of rangefinding methods.
3. To study the issue of using a laser rangefinder in unmanned system

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| Вступ.....   | 7  |
| 1 Фізико-математичні основи лазерної далекометрії..... | 8  |
| 1.1 Принцип роботи лазерних далекомірів.....           | 8  |
| 1.2 Типи лазерних далекомірів .....                    | 8  |
| 1.3 Активні далекоміри.....                            | 9  |
| 1.3.1 Імпульсний далекомір.....                        | 9  |
| 1.3.2 Фазовий далекомір.....                           | 15 |
| 1.4 Пасивні далекоміри.....                            | 20 |
| 1.4.1 Стереоскопічні монокулярні далекоміри .....      | 21 |
| 1.4.2 Стереоскопічні бінокулярні далекоміри.....       | 25 |
| 1.5 LIDAR.....   | 27 |
| 1.5.1 Властивості випромінювання .....                 | 27 |
| 1.5.2 Фактори похибки.....                             | 28 |
| 2 Практична реалізація безпілотних систем.....         | 30 |
| 2.1 Застосування в промисловості.....                  | 30 |
| 2.2 Застосування у навігації .....                     | 32 |
| 2.2.1 Загальна схема лазерної локації .....            | 33 |
| 2.2.2 Геометричні схеми лазерної локації .....         | 34 |
| 2.2.3 Об'єкти локації.....                             | 39 |
| 2.2.4 Оптичні перешкоди.....                           | 40 |
| 3 Безпілотні системи .....                             | 41 |
| 3.1 Lidar в безпілотних автомобілях.....               | 41 |
| 3.2 Lidar в безпілотних літальних апаратах.....        | 44 |
| 3.2.1 Lidar сканер у БПЛА .....                        | 45 |
| Висновки .....   | 49 |
| Перелік джерел посилання .....                         | 51 |
| Додаток А Демонстраційний матеріал.....                | 52 |

## ВСТУП

Вимір відстаней є важливим завданням у багатьох областях серед галузей, у яких розповсюджується лазерна далекометрія, слід відзначити військову справу, навігацію, геодезію та топографічну зйомку, і фотографію, і багато іншого. Також завдяки останнім досягненням набувають популярності в розробці нанотехнологій та мікропроцесорів. Лазерні далекоміри є одним із найбільш точних та зручних засобів вимірювання відстаней.

Лазерна далекометрія – це метод вимірювання відстані до об'єкта із використанням лазерного променя. Чудово підходить як для близьких, так і для великих відстаней, оскільки технологія призначена для швидкого та точного вимірювання. За допомогою далекомірів можна проводити вимірювання відстані до об'єктів з високою відбивною здатністю (наприклад, дорожні знаки), з середньою відбивною здатністю (наприклад, різні будівлі) і з низькою відбивною здатністю (наприклад, дерева, прапорці для гольфу).

Базовою функцією будь-якого далекоміра є вимірювання відстані до об'єкта, але функціонал приладів також може бути доповнений функціями вимірювання швидкості, кута, висоти, проекції та ін. Сучасні далекоміри відрізняються ергономічним, продуманим дизайном, відповідним концепції сучасної інженерії. Враховуючи, що прилад може використовуватися в різних кліматичних і експлуатаційних умовах, як правило мають захищений корпус для захисту від ударів та падінь водонепроникні і пилонепроникні технології що мінімізує ризики несправності приладу.

# 1 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ ЛАЗЕРНОЇ ДАЛЕКОМЕТРІЇ

## 1.1 Принцип роботи лазерних далекомірів

Лазерна далекометрія є одним з найточніших і найнадійніших способів вимірювання відстаней. Основою цього методу є фізичні принципи поширення світла, точного вимірювання часу та властивостей лазерного випромінювання. Вона ґрунтується на принципах оптики, електромагнетизму, хвильової теорії та прикладної математики. Завдяки високій точності вимірювання та універсальності застосування, вона широко використовується в науці, робототехніці, медицині, військовій справі та навігації. У лазерних далекомірах застосовуються, переважно, імпульсні лазери. Вони випускають короткі імпульси світла, які відбиваються від об'єкта, і далі пристрій вимірює час, за який сигнал повертається назад, щоб обчислити відстань.

За принципом дії далекоміри поділяються на два типи: активні і пасивні. До активних далекомірів відносять: звукові далекоміри; світлові далекоміри; лазерні далекоміри і далекоміри інших конструкцій. До пасивних далекомірів відносять: далекоміри, які використовують оптичний паралакс; далекоміри, що використовують зіставлення об'єкта зі зразком і далекоміри інших конструкцій. Принцип дії далекомірів активного типу полягає у вимірі часу, який витрачає посланий далекоміром сигнал для проходження відстані до об'єкту і назад. Лазерні далекоміри працюють на основі використання лазерного випромінювання для вимірювання відстаней. Вони складаються з декількох компонентів, включаючи лазерне джерело, оптичну систему та сенсор. Виділяють три методи вимірювання імпульсний, фазовий і триангуляційний.

## 1.2 Типи лазерних далекомірів

Крім того, що поділяються на активні і пасивні: активні далекоміри випромінюють лазерний промінь і вимірюють час його повернення після відбиття від об'єкта, щоб визначити відстань. Пасивні далекоміри, натомість, працюють на

основі вимірювання інтенсивності світла, яке випромінює об'єкт, але не випромінюють власного світла. Ще вони поділяються залежно від їхньої функціональності. Одномірні лазерні далекоміри використовуються для вимірювання лише одного вимірювання, відстані до об'єкта. Двовимірні та тривимірні лазерні далекоміри забезпечують вимірювання двох або трьох вимірювань відповідно. Одновимірні лазерні далекоміри найчастіше використовуються для вимірювання відстаней до об'єктів. Вони широко використовуються в геодезії, будівництві та інших сферах, де необхідно точно вимірювати відстані. В той час як двовимірні та тривимірні лазерні далекоміри дозволяють вимірювати як відстань, так і інші параметри об'єктів, такі як висота, ширина та об'єм. Вони широко застосовуються в архітектурі, промисловості та інших сферах, де необхідно отримати додаткові дані про об'єкти.

Також лазерні далекоміри можуть бути стаціонарними чи портативними залежно від призначення. Стаціонарні лазерні далекоміри зазвичай встановлюються на спеціальних позиціях, наприклад, штативах, і використовуються для обмірів великих площ. Портативні лазерні далекоміри мають компактний розмір і можуть використовуватися в польових умовах, що робить їх ідеальним вибором для роботи на місці.

### 1.3 Активні далекоміри

#### 1.3.1 Імпульсний далекомір

Метод часового виміру за допомогою імпульсного далекоміру заснований на вимірі часу проходження лазерного імпульсу до об'єкта та його повернення відбитого від об'єкта. Знаючи швидкість розповсюдження світла та час його повернення, можна обчислити відстань до об'єкта. Цей метод широко використовується в багатьох лазерних далекомірах через його простоту та точність. Лазерні імпульсні далекоміри цими далекомірами дистанція  $S$  вимірюється через визначення інтервалу часу, який потрібен імпульсу лазерного

випромінювання для подолання дистанції від далекоміра до об'єкта і назад. На рисунку 1.1 показана спрощена функціональна схема такого далекоміра.

Схема має такі структурні елементи: 1 – лазерний випромінювач колімованого пучка променів; 2 – світлоділльник; 3 – формувач стартового електричного імпульсу; 4 – об'єкт; 5 – формувач фінішного електричного імпульсу; 6 – генератор і лічильник тактових імпульсів.

Сформований лазерний імпульс на світлоділльнику 2 розділяється на два потоки. Один з них спрямовується на формувач стартового електричного імпульсу 3, другий направляється в сторону об'єкта.

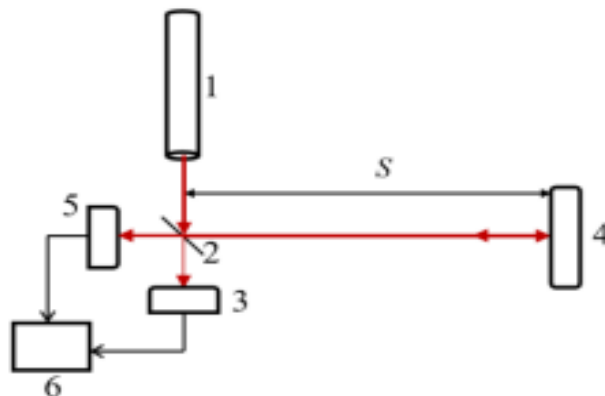


Рисунок 1.1 – Спрощена функціональна схема імпульсного лазерного далекоміра

Відбитий від об'єкту потік лазерного випромінювання через оптичну систему далекоміра (на рисунку ця система не показана) попадає на формувач фінішного електричного імпульсу 5. Стартовий імпульс запускає лічильник тактових імпульсів, які виробляє спеціальний генератор, фінішний імпульс припиняє підрахунок тактових імпульсів.

Цей метод базується на прямому вимірюванні часу польоту імпульсу. Коли лазер випускає короткий імпульс, система фіксує, через скільки часу він повернеться. Поділивши цей час навпіл і помноживши на швидкість світла, отримуємо відстань. Тобто визначена в такий спосіб кількість тактових імпульсів  $N_{\text{імп}}$ , помножена на інтервал часу  $\tau$  – період тактових імпульсів, дозволяє

визначити час проходження лазерного імпульсу від далекоміра до об'єкту і в зворотному напрямку  $t = N_{\text{імп}} \tau$ , а потім розрахувати дистанцію  $S$ , через швидкість світла в повітрі  $v$ :

$$S = v \cdot t = \frac{v N_{\text{імп}} \tau}{2}. \quad (1.1)$$

Оскільки швидкість світла в повітрі  $v \approx 3 \times 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , то 1 м дистанції світло пробігає за час  $t = \frac{1\text{м}}{3 \times 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 3,33 \times 10^{-9} \text{с}$ . А це означає, що для забезпечення достатньої точності функціонування такого далекоміра на невеликих відстанях до об'єктів потрібно мати прецизійні формувачі стартових та фінішних імпульсів, генератор тактових імпульсів з гігагерцовою, а іноді із терагерцовою частотою, з відповідним прецизійним лічильником тактових імпульсів. Все це є складною в реалізації технічною і технологічною задачею [1].

Метод напряму залежить від точності визначення часу за допомогою безпосереднього рахунку тактових імпульсів або ж підрахунок кількості імпульсів тактового генератора зокрема, цифровим електронно-лічильним частотоміром, що надійшли сигналами старту і стопу. В основу роботи цифрових частотомірів покладений принцип дискретної лічби: підрахунок кількості імпульсів за певний проміжок часу, який має багато переваг. До них відносяться: широкий діапазон вимірювань, висока точність і завадостійкість і таке інше. Вимірювання частоти здійснюється прямим порівнянням частоти досліджуваного сигналу  $f_c$  із значенням зразкової частоти  $f_{\text{зразк}}$ , створеною кварцовим генератором, у якості міри. Найбільш оптимальним в плані зменшення похибки результату вимірювання цей режим буде за умови, якщо вимірювана частота у багато разів перевищує частоту зразкового сигналу.

У цьому режимі періодичний сигнал з частотою  $f_c$  подається на частотний вхід 1 (рис. 1.2). Після вхідного пристрою 1 досліджуваний сигнал поступає через комутатор 2. Ключ комутатора знаходиться в положенні «1» на перетворювач аналогового сигналу в дискретний «3».

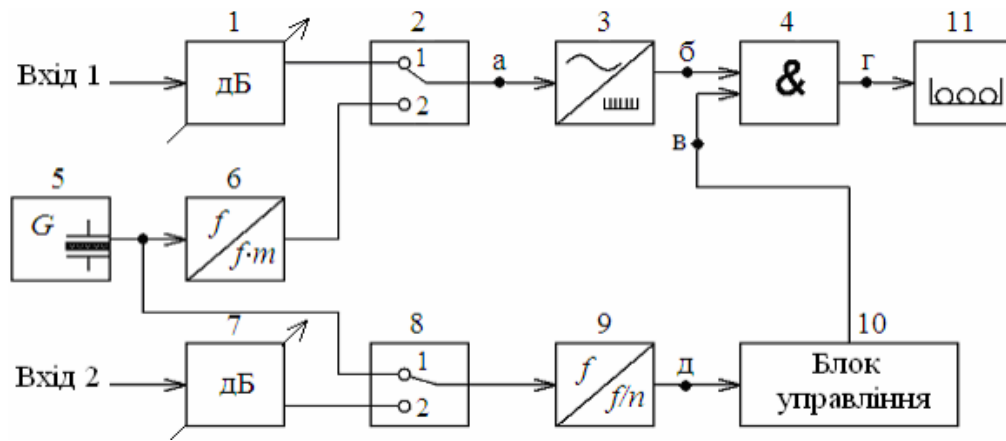
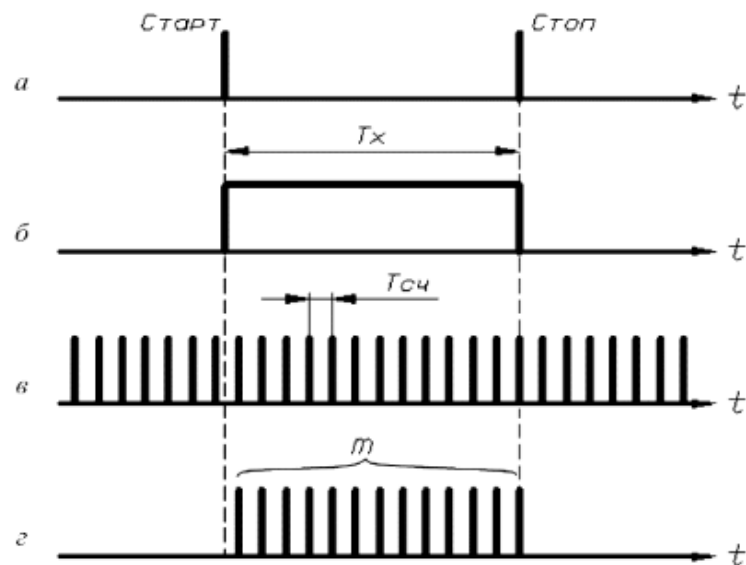


Рисунок 1.2 – Структурна схема електронного генератора-лічильника тактових імпульсів (відповідно (б) на рис. 1.1)

Досліджуваний сигнал (наприклад, синусоїдальний) перетвориться в періодичну послідовність коротких імпульсів (рис. 1.3).

Окремі імпульси цієї послідовності можуть бути сформовані в моменти переходу синусоїдального сигналу через нульовий рівень з похідною того ж знаку.



*а* – старт і стоп-імпульси; *б* – прямокутний імпульс;

*в* – періодична послідовність рахункових імпульсів;

*г* – *m* вирізаних імпульсів перетвориться в прямокутний імпульс.

Рисунок 1.3 – Дискретна діаграма вимірювання часових інтервалів

Таким чином, частота проходження цих імпульсів співпадає з частотою  $f_c$  вимірюваного сигналу. Далі ця послідовність імпульсів поступає на один із входів часового селектора 4. На інший вхід часового селектора подається, так званий, стробуючий імпульс. Формування стробуючого імпульсу відбувається в управляючому каналі, в якому напруга зразкової частоти, яка генерується кварцовим генератором, подається через комутатор 8 (ключ комутатора знаходиться в положенні «1» через блок ділення частоти 9 на формувач 10.

Суть способу зводиться до підрахунку числа імпульсів  $N$ , які поступають на рахунковий блок 11 за час, що дорівнює  $T_{\text{ліч}}$ , названий «ЧАС ВИМІРЮВАННЯ» або «ЧАС ЛІЧБИ».

Тобто:

$$N = \frac{T_{\text{ліч}}}{T_{\text{ед}}} T_{\text{ліч}} f_{\text{ед}}, \quad (1.2)$$

де  $f_{\text{ед}}$  – дійсне значення вимірюваної частоти.

Таким чином, частота досліджуваного сигналу визначається виразом:

$$f_{\text{ед}} = \frac{N}{T_{\text{ліч}}}, \quad (1.3)$$

де  $T_{\text{ліч}} = T_{\text{кг}}$ .

При вимірюванні в рахунковий блок поступить  $(N \pm 1)$  імпульс за рахунок дискретизації, тоді:

$$f_{\text{зм}} = \frac{N \pm 1}{T_{\text{ліч}}}, \quad (1.4)$$

де  $T_{\text{ліч}} = nT_{\text{кг}}$ ;

$T_{\text{кг}}$  – період коливань кварцового генератора;

$n$  – коефіцієнт ділення частоти (блок 9) [2].

При вимірюванні частоти за допомогою електронно-лічильного частотоміра (ЕЛЧ) мають місце дві похибки: міри (за рахунок нестабільності частоти кварцового генератора) та порівняння (за рахунок дискретизації). У сучасних цифрових частотомірах застосовуються кварцові генератори з відносною

нестабільністю частоти порядку від  $\pm 10^{-10}$  до  $10^{-12}$ . Похибка порівняння визначається, головним чином, похибкою дискретності, тобто обумовлена тим, що фронт і спад керуючого(стробуючого) імпульсу, не синхронізовані з моментами появи імпульсів періодичної послідовності, сформованої з досліджуваного сигналу або, іншими словами, ця похибка пов'язана з не кратністю періодів вимірюваного сигналу та зразкового.

Максимальне значення абсолютної похибки дискретності  $\Delta N$ :

$$\Delta N = f_{зм} - f_{ед} = \frac{N \pm 1}{T_{ліч}} - \frac{N}{T_{ліч}} = \pm \frac{1}{T_{ліч}}. \quad (1.5)$$

Вона не залежить від частоти досліджуваного сигналу і виражається в Герцах. Зменшити значення абсолютної похибки можна за рахунок збільшення часу вимірювання  $T_{ліч}$  [2].

Вимірюваний інтервал часу, заданий старт і стоп-імпульсами (рис. 1.3, (а, б)), який «вирізає» з періодичної послідовності рахункових імпульсів (рис. 1.3, в) ділянку, що містить  $m$  імпульсів (рис. 1.3, г). Значення вимірюваного інтервалу часу визначається як  $T_x = mT_{рах}$ . Структурна схема вимірювача часових інтервалів, що реалізує цей метод, наведена на рис. 1.2. Між генератором рахункових імпульсів і лічильником включений тимчасової селектор, через який рахункові імпульси проходять на лічильник тільки тоді, коли на нього впливає стробіруючий імпульс тривалістю  $T_x$ , сформований блоком формування з старт і стоп-імпульсів. Такий метод відрізняється хорошою лінійністю і великим динамічним діапазоном. Власне дозвіл методу безпосереднього рахунку становить  $\pm T_{рах}$ , наприклад  $\pm 5$  нс при частоті проходження рахункових імпульсів 200 МГц, що відповідає відстані  $\pm 0,75$  м розширення можна поліпшити за допомогою усереднення, але одночасно з цим збільшується і час вимірювання.

Основний внесок в похибку вимірювання дальності до об'єкта вносять похибки, що виникають при вимірі тимчасового інтервалу між моментами послідовної і прийому випромінювання зондуємого імпульсу. Серед них можна виділити:

– систематичну похибку, яка обумовлена різним часом затримки сигналу в каналах фіксації випромінюваного (старт-) і прийнятого (стоп-) імпульсів;

– похибку, яка обумовлена кінцевою дискретністю вимірювача часових інтервалів;

– похибка тимчасової фіксації імпульсів випромінювання.

Імпульсні далекоміри використовують для роботи з об'єктами, віддаленими на кілометри, коли допустимі похибки вимірювання дальності можуть складати одиниці і десятки метрів. Потрібно також відмітити, що збільшення максимальної робочої дистанції імпульсного далекоміра супроводжується суттєвим зростанням габаритів і ускладненням його оптичної системи, а також потребує більшої потужності лазера. Перевага методу – простота, недолік – необхідність точного таймера (похибки навіть у наносекундах викликають зміщення в метрах).

### 1.3.2 Фазовий далекомір

Фазовий метод базується на аналізі різниці фаз між відправленим та відбитим сигналами, яка виникає через ефект Доплера при якому частота хвилі, яку спостерігає приймач, змінюється в залежності від відносного руху джерела хвилі та приймача. Він дозволяє виокремити рухомі об'єкти, усуваючи перешкоди від нерухомих предметів. У фазовому методі використовується той факт, що відбитий від рухомого об'єкта сигнал має зміщену фазу. Як і в імпульсному фазовий далекомір також вимірює інтервал часу, що потрібен для проходження світла від далекоміра до об'єкту та назад (рис. 1.4).

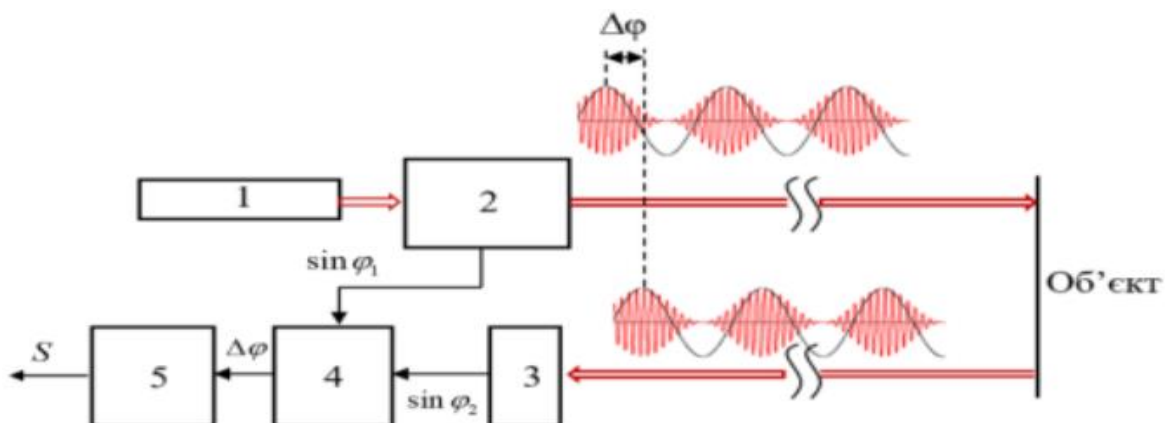


Рисунок 1.4 – Спрощена функціональна схема фазового далекоміру

До схеми фазового далекоміра входять: 1 –джерело колімованого лазерного випромінювання; 2 – амплітудний модулятор; 3 – фотоприймачевий пристрій; 4 –цифровий синхронний детектор; 5 – обчислювальний пристрій.

Проте цей інтервал вимірюється не прямо, а опосередковано через вимірювання різниці фаз амплітудно модульованого лазерного потоку на виході з далекоміру та на вході в далекомір після відбиття потоку від об'єкту.

Відстань, яку проходить світлова хвиля за час  $t$ , дорівнює:

$$l = ct, \quad (1.6)$$

де  $c$  – швидкість світла.

За той же час фаза модульованого лазерного випромінювання, що пройшло шлях від джерела далекоміра до об'єкта і назад, зміниться на величину:

$$\varphi = 2\pi f_M, \quad (1.7)$$

де  $f_M$  – частота модуляції випромінювання.

Таким чином, дальність до об'єкта можна визначити з виразів (1.7) і (1.8) як:

$$l = c \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_M}. \quad (1.8)$$

При вимірюванні фази виникає похибка  $\Delta\varphi$ . Відповідна похибка у вимірюванні відстані  $\Delta l$  має вигляд:

$$\Delta l = c \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_M}. \quad (1.9)$$

Аналіз формули (1.6) дозволяє зробити висновок, що похибка вимірювання дальності  $\Delta l$  тим нижче, чим вище частота модуляції, але для однозначного

визначення дальності зміна фази  $\varphi$  на вимірюваному відстані повинно бути менше  $2\pi$ , тобто подвійна відстань не повинна перевищувати довжину хвилі модуляції.

Цей метод дозволяє досягати високої точності, особливо на коротких дистанціях, але складніший у реалізації.

Джерело лазерного випромінення 1 випромінює в постійному режимі монохроматичні хвилі. Проходячи через амплітудний модулятор 2, який може бути реалізованим на електрооптичних кристалах з коміркою Поккельса або Керра, потік випромінення періодично змінюється в часі за синусоїдальним законом:

$$\Phi(t) = \frac{\Phi}{2} \left[ 1 + \sin \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right], \quad (1.10)$$

де  $\Phi$  – потік випромінення на виході з модулятора;

$t$  – поточний час;

$t \frac{2\pi}{T} = \varphi(t)$  – поточна фаза модуляції;

$T$  – період модуляції.

Величина, зворотна періоду  $\nu_m = \frac{1}{T}$ , є частотою модуляції, яка визначається робочим діапазоном далекоміра. Так при модуляції світлового потоку лазера однією частотою  $\nu_m$  інтервал часу для переміщення світлового потоку від далекоміра до об'єкту і назад до далекоміра (дистанція  $2S$ ), не повинен бути меншим за один період модуляції  $T = \frac{1}{\nu_m}$ . У протилежному випадку зміна фази синусоїдального сигналу перевищить  $2\pi$  або  $360^\circ$ , що призведе до неможливості визначити кількість періодів і, як наслідок, до неможливості визначити дистанції до об'єкту. Якщо в момент початку сеансу вимірювання дистанції час має значення  $t_1$ , а в кінці сеансу –  $t_2$  то стартова фаза модуляції  $\varphi_1 = \frac{2\pi}{T} t_1$ , а кінцева фаза  $\varphi_2 = \frac{2\pi}{T} t_2$ . При цих значеннях фаз  $t_1 = \frac{T}{2\pi} \varphi_1$ ,  $t_2 = \frac{T}{2\pi} \varphi_2$ :

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{T}{2\pi} (\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{T}{2\pi} \Delta \varphi. \quad (1.11)$$

За час  $\Delta t$  світлова хвиля зі швидкістю  $v$  пробігає подвійну дистанцію до об'єкта і назад тому  $2S = v \cdot \Delta t$ , звідки:

$$S = \frac{vT}{4\pi} \Delta \varphi. \quad (1.12)$$

При робочому діапазоні далекоміра від 0 до 500 м згідно (1.13) потрібно мати частоту модуляції  $\nu_m$  випромінювання лазера не більшу ніж 30 КГц.

Відбите від об'єкту світло потрапляє на вхід фотоприймачевого пристрою 3, на якому воно перетворюється в електричний сигнал з частотою  $\nu_m$ , але з поточною фазою  $\varphi_2$ . Далі з цією фазою він подається на другий вхід цифрового синхронного детектора 4, куди одночасно на перший вхід від модулятора подається електричний сигнал з фазою  $\varphi_1$ . На виході синхронного детектора виробляється сигнал, пропорційний різниці фаз  $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ , який потім використовується обчислювальним пристроєм 5 для розрахунку дистанції  $S$  за формулою (1.12). Для підвищення точності вимірювання дистанції  $S$  використовується додаткова частота модуляції, і навіть дві додаткових, які крім того дозволяють визначати кількість повних періодів у різниці фаз  $\Delta \varphi$  [1].

Фазовий аналіз: фазовий метод вимірювання вимагає того, щоб джерело далекоміра безперервно випромінював вздовж лінії вимірювання гармонічні коливання. Гармонічні коливання – це група періодичних коливань, які описуються рівняннями синусоїдальної функції.

$$x = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi). \quad (1.13)$$

де  $A$  – амплітуда гармонічного коливання, а аргумент синуса або косинуса – його поточна фаза, яка є лінійною функцією часу і визначає стан гармонічно змінюваної величини в момент часу  $t$ . Фаза вимірюється в кутових величинах. Величини  $\varphi_0$  називають початковими фазами. Їх значення обумовлене вибором початку відліку часу. Фаза коливань є пропорційною до частоти коливань. Частота  $f$  – це кількість циклів коливань, які здійснюються за одну секунду. Одиницею

частоти є герц ( $1 \text{ Гц} = 1/\text{с}$ ). Частота коливань є оберненою пропорційною до періоду коливання:  $T = \frac{1}{f}$ . Період – це час, за який здійснюється один повний цикл коливання (рис. 1.5). Відрізок, на який розповсюджується хвиля за час рівний одному періодові, називають довжиною хвилі коливання  $\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$ .

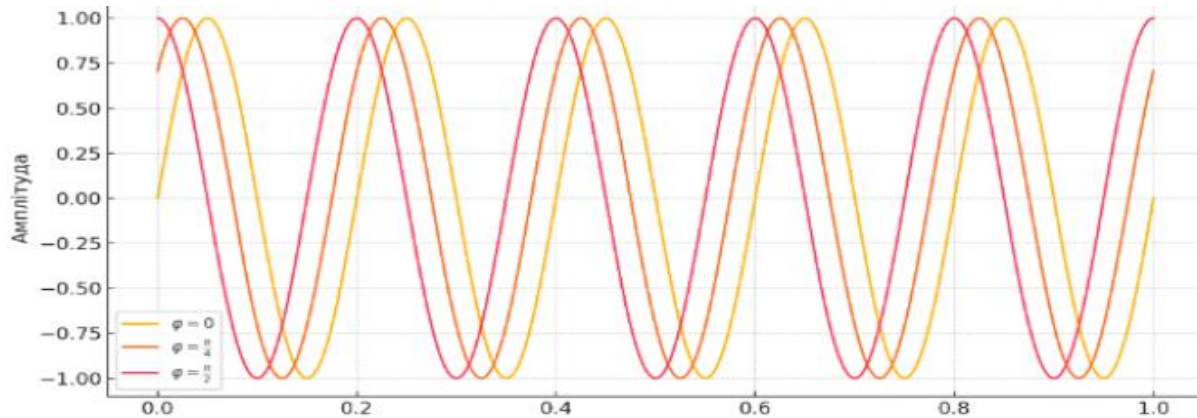


Рисунок 1.5 – Різниця фаз коливання обумовлена різницею початкової фази

Такий фазовий зсув є основою фазового методу лазерної далекометрії: чим більше зсув, тим далі розташований об'єкт. Джерело випромінює коливання в певному напрямку та одночасно починає відлік часу які проходять лінію вимірювання, відбиваються, другий раз проходять цю лінію і приймаються приймачем. Коливання з приймача та частина коливань, що випромінює передавач, тобто прямі та відбиті коливання, різницю фаз прямих і відбитих коливань  $\Delta\varphi$ , можна представити як  $\Delta\varphi = \varphi_{\text{п}} - \varphi_{\text{в}} = 2\pi f t$ , йдуть на вимірювальний пристрій (фазометр). Він вимірює різницю фаз коливань (фазовий зсув), які потрапляють на нього.

Фазовий зсув вимірюється у обчислювальному пристрою між прийнятим і відправленим сигналами – це ключ до визначення відстані. Для зменшення неоднозначностей застосовується кілька частот, і результати комбінуються за принципом суперпозиції [2].

Досягнення в галузі фазометрії створюють передумови для досягнення високої точності лазерної фазової далекометрії. В них похибки визначення

дистанції до об'єкта можуть становити до  $\pm 0,5$  мм. Проте у фазових далекомірів є суттєвий недолік. Потрібний для їх функціонування безперервний режим випромінювання лазера накладає обмеження на потужність лазера. Вона істотно менша ніж у лазерів імпульсного типу. А це не дозволяє використовувати їх для вимірювань великих дистанцій через поглинання світла в атмосфері. До того ж вимірювання різниці фаз з великою точністю потребує часу, що обмежує швидкодію приладу.

#### 1.4 Пасивні далекоміри

Серед оптичних далекомірів найбільший різновид складають пасивні далекоміри, для функціонування яких достатньо первинного чи вторинного випромінювання самих об'єктів, до яких вимірюється дистанція. В цьому полягає їх головна перевага перед активними далекомірами, оскільки вони забезпечують маскування роботи далекоміра, що дуже важливо у військовій справі. В пасивних далекомірах інформація про дистанцію до об'єкту міститься в оптичному зображенні об'єкта – в його кутовому чи лінійному розмірі, в його положенні вздовж оптичної осі відносно кардинальних точок оптики далекоміра, у ракурсах, під яким об'єкт спостерігається з різних точок простору.

Переважає кількість пасивних далекомірів для визначення дистанції до об'єкту використовують геометричну фігуру – трикутник, ще такий метод називають триангуляційним. Розташування вершини трикутника відносно об'єкту або далекоміру визначає принцип його дії приналежність до відповідного типу. Сторона трикутника, що розташована навпроти його вершини, є базою далекоміра. Якщо вершина трикутника знаходиться на об'єкті, далекоміри відносяться до стереоскопічних. В них базовий елемент знаходиться в самому далекомірі.

Триангуляційний метод заснований на вимірі кута, під яким відбите лазерне випромінювання повертається на детектор. Використовуючи трикутник з відомою довжиною однієї з його сторін та виміряним кутом, можна обчислити відстань до об'єкта. Цей метод є одним із найбільш точних способів вимірювання відстаней.

Використовується у пристроях з візуальним сенсором. Лазерна точка падає на об'єкт, а камера фіксує її зміщення залежно від відстані. Обчислення ведеться на основі трикутника, сформованого між лазером, камерою і точкою на об'єкті [1].

#### 1.4.1 Стереоскопічні монокулярні далекоміри

Всі стереоскопічні далекоміри в якості бази використовують дистанцію між двома точками простору, з яких спостерігається об'єкт (рис. 1.6).

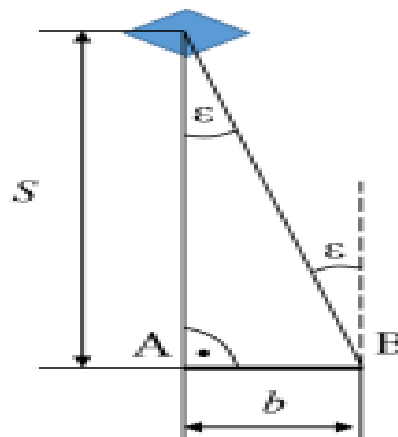
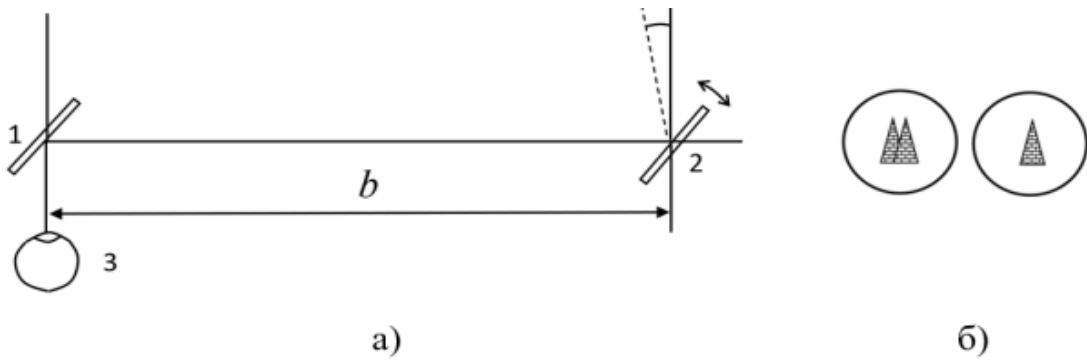


Рисунок 1.6 – Далекомірний трикутник:  $AB = b$  – база далекоміра;  
 $\varepsilon$  – паралактичний кут;  $S$  – дистанція до об'єкту

З трикутника на рис. 1.6 дистанція дорівнює:

$$S = b \operatorname{ctg}(\varepsilon) = \frac{b}{\operatorname{tg}(\varepsilon)}. \quad (1.14)$$

Оптична система найпростішого монокулярного далекоміру складається з двох дзеркал, рознесених на відстань бази  $b$ , (рис. 1.7, а).



1 – нерухоме напівпрозоре дзеркало; 2 – рухоме поворотне дзеркало;  
3 – око оператора.

Рисунок 1.7 – Оптична схема стереоскопічного далекоміру

Око оператора бачить два зображення об'єкту, якщо дзеркало 2 не спрямовує зображення об'єкту у напрямку оптичної осі між дзеркалами, рис. 1.7, б, вигляд поля зору показане зліва. Механізм, що дозволяє змінювати кутове положення дзеркала 2 для зміни кута  $\varepsilon$ , має шкалу дистанцій. В момент, коли при повороті дзеркала 2, рис. 1.7, б, вигляд поля зору справа, обидва зображення об'єкту поєднуються в одне, оператор зі шкали знімає показання дистанції  $S$ . Така система приладу, хоча і є найпростішою, проте вона не забезпечує високої точності визначення дистанції через обмежену можливість зорового органу людини точно поєднувати два зображення в одне [1].

На рисунку 1.8 показана оптична система більш досконалого монокулярного далекоміра, яка у порівнянні з попередньою дозволяє набагато підвищити точність вимірювання дистанції до об'єкту.

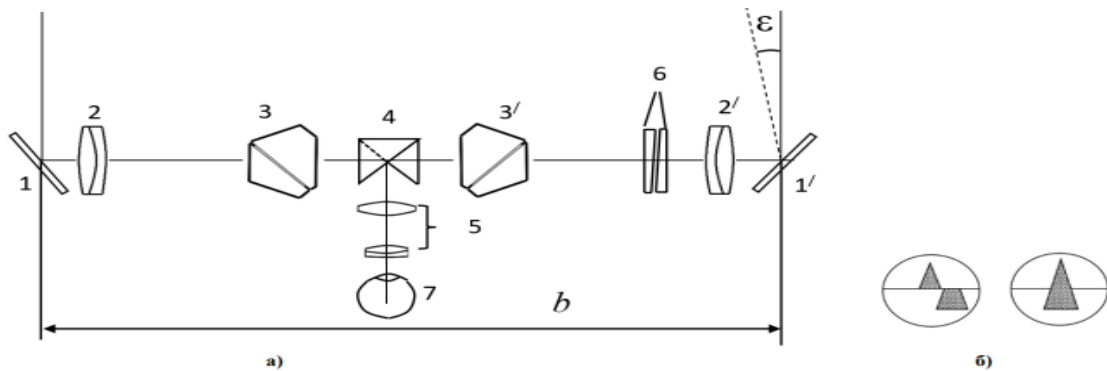


Рисунок 1.8 – Оптична схема монокулярного стереоскопічного далекоміра

В оптичній схемі на рис. 18, а: 1, 1' – плоскі відбивальні дзеркала; 2, 2' – об'єктиви зорових труб; 3, 3' – призмові обертальні системи; 4 – відбивачі; 5 – окуляр зорових труб; 6 – клини; 7 – око оператора; на рис. 1.8, б: ліворуч – вигляд об'єкту в окулярі до вимірювання дистанції; праворуч – вигляд об'єкту при визначенні дистанції до об'єкту

Оптична система монокулярного стерео далекоміру має два оптичні канали, представлені зоровими трубами системи Кеплера. Труби складаються з об'єктивів 2, 2', призмових обертальних систем 3, 3', потрібних для отримання прямого зображення об'єкту (на рисунку показані призми Пехана), двох відбивачів 4, складених із двох дзеркал або із двох прямокутних призм, у яких зовнішня поверхня гіпотенузової грані є дзеркальною, причому відбивачі по вертикалі розташовані в контакті одна над однією. Вихідним елементом оптичної системи є окуляр 5, загальний для обох зорових труб.

Задній фокус обох об'єктивів та передній фокус окуляра знаходяться в одній точці на лінії перетину (при вигляді зверху) дзеркальних граней призм. Оптичні осі лівого та правого каналу далекоміра встановлені паралельно одна одній.

Відбивачі 4, при вказаному їх розташуванні в системі Кеплера, ділять зображення об'єкту, що сформовані об'єктивами, на дві частини – верхню та нижню (рис. 1.8, б). Якщо об'єкт знаходиться на безкінечності, то оператор бачить об'єкт як цілий (рис. 1.7, б), вигляд зображення праворуч. При кінцевій відстані до об'єкту у правому каналі далекоміру зображення об'єкту розділяється на дві

частини. Оператор бачить в окуляр розсунуті по горизонталі верхню і нижню частини зображення (рис. 1.8, б), поле зору ліворуч. Для отримання зображення об'єкту до не розділеного вигляду оператор за допомогою спеціального механізму обертає клини 6 навколо оптичної осі строго в протилежних напрямках. Вони утворюють сумарний клин із плавно змінним кутом при вершині, який компенсує кутове зміщення об'єкту в правому каналі відносно оптичної осі об'єктиву 2' на кут  $\varepsilon$ . Механізм обертання клинів 6 має шкалу, на якій вказується відстань  $S$  до об'єкту при його нерозділеному зображенні.

Похибка  $\delta S$  визначення дистанції монокулярним стереоскопічним далекоміром при точно визначеному розмірі бази  $b$  в основному залежить від похибки вимірювання паралактичного кута  $\varepsilon$ . У відповідності здиференційованою по  $\varepsilon$  формулою (1.14):

$$\delta S = \frac{-b}{\varepsilon^2} \delta \varepsilon = -S \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}, \quad (1.15)$$

де  $\delta \varepsilon$  – похибка вимірювання паралактичного кута  $\varepsilon$ .

Нормальний зоровий орган оператора дозволяє йому при сприятливих умовах реагувати на не суміщення розділених частин зображення до  $10''$ . При кутовому збільшенні зорової труби  $\gamma = 10$  похибка визначення паралактичного кута  $\delta \varepsilon = \frac{10''}{\gamma} = 1'' = 4,85 \cdot 10^{-6}$ . Якщо у далекоміра база  $b = 300$  мм, дистанція  $S = 500$  м, то  $\varepsilon = \frac{300}{500000} = 6 \times 10^{-4}$ . Із формули (1.15), після похідної з неї по  $\varepsilon$ , абсолютне значення похибки дорівнює:

$$|\delta S| = \frac{b}{\varepsilon^2} \delta \varepsilon = S \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 500 \frac{4,85 \times 10^{-6}}{6 \times 10^{-4}} = 4,04 \text{ м},$$

що становить  $\frac{4,04 \text{ м}}{500 \text{ м}} \times 100 \% = 0,81 \%$  дистанції.

Як видно з наведених розрахунків, підвищення точності вимірювань дистанції  $S$  забезпечують зорові труби. Чим більшим є їх кутове збільшення  $\gamma$ , тим меншою буде похибка вимірювання паралактичного кута. Але при  $\gamma > 10$

зображення стає надто рухомим через тремор рук оператора, що заважає точному поєднанню розсунутих половинок зображення. В таких випадках далекомір необхідно встановлювати на штативі. Підвищення точності далекоміра за рахунок збільшення бази  $b$  супроводжується зростанням габаритів приладу, що також є не завжди допустимим. В цьому полягають недоліки такого типу далекоміра.[1]

#### 1.4.2 Стереоскопічні бінокулярні далекоміри

Головна відмінність бінокулярного далекоміра від монокулярного полягає в принципово іншому використанні особливостей зорового органу людини, а саме – в здатності людини сприймати глибину простору завдяки функціонуванню двох очей. Між двома очима людини є дистанція – база  $b$ , яка дорівнює від 50 мм до 70 мм, через яку положення зображення об'єкту на сітківці правого ока відрізняється від положення зображення того самого об'єкту на сітківці лівого ока. Ця відмінність обробляється мозковим центром зорового органу так, що людина відчуває дистанцію до кожного з об'єктів, які знаходяться в діапазоні стереоскопічного зору. Поріг чутливості мозку до наявності паралактичного зсуву вказаних зображень на сітківках при спостереженні об'єкта двома очима складає приблизно  $\varepsilon_{\text{пор}} \approx 10'' = 4,85 \times 10^{-5}$  рад. При цьому радіус стереоскопічного зору згідно формули (1.14) становить  $R = \frac{b}{\varepsilon_{\text{пор}}} = \frac{50 \div 70}{4,85 \times 10^{-5}} = (1031 \div 1444)\text{м}$ .

Значення  $R$  можна суттєво збільшити, якщо штучно збільшити базу  $b$ , озброївши око оптичною системою (рис. 1.9).

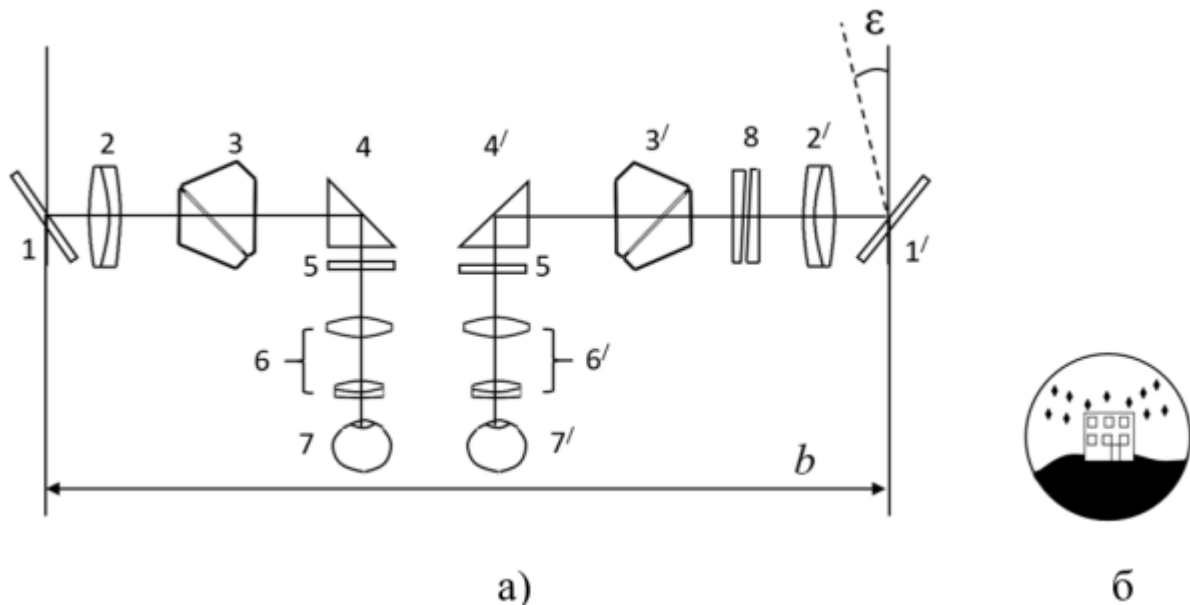


Рисунок 1.9 – Оптична схема стереоскопічного бінокулярного далекоміра

На рис. 1.9, а маємо позначення: 1, 1' – плоскі відбивальні дзеркала (або системи дзеркал чи призм); 2, 2' – об'єктиви зорових труб; 3, 3' – призмові обертальні системи; 4 – відбивальні призми; 5 – плоскопаралельні пластини з марками 6, 6', – окуляри зорових труб; 7, 7' – ліве і праве око оператора; 8 – клиновий компенсатор паралактичного кута; на рис. 1.9, б: зображення, що спостерігає оператор через далекомір

До тих пір, поки візирні осі обох каналів не перетинаються на об'єкті, оператор сприймає через окуляри зображення об'єкту і зображення марок на різних від себе відстанях. Обертаючи в протилежні сторони клини кутового клинового компенсатора 8 за допомогою спеціального механізму із шкалою дистанцій, оператор фіксує дальність до об'єкту, коли зображення об'єкту і зображення марок суб'єктивно сприймаються на однаковій віддаленості від оператора. Похибка вимірювання дистанції бінокулярним стереоскопічним далекоміром ідентична похибці монокулярного, тому вона описується формулою (1.15) [1].

## 1.5 LIDAR

LIDAR (Light Detection and Ranging) Це складна система, яка використовує комбінацію імпульсного методу з обертанням сканера яка використовує лазерні імпульси для вимірювання відстаней. LiDAR – це технологія отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища поглинання і розсіювання світла в оптично прозорих середовищах. Вона широко застосовується у різних галузях, включаючи автоматизацію транспорту, картографію та дослідження навколишнього середовища. Використання LIDAR у системах автоматичного керування автомобілем. Допомога при паркуванні, визначення перешкод у реальному часі.

Працює LIDAR наступним чином:

- 1) випромінювання лазерного імпульсу: лідар відправляє лазерні імпульси у довкілля;
- 2) відображення та розсіювання: лазерні імпульси відбиваються від об'єктів і розсіюються у повітрі;
- 3) прийом та обробка: лідарна система реєструє відображені імпульси та розраховує відстань до об'єктів на основі часу їх повернення;
- 4) створення 3D-моделі: отримані дані використовуються для створення тривимірної карти або моделі довкілля.

### 1.5.1 Властивості випромінювання

Лазерне випромінювання є:

- 1) когерентним: усі хвилі мають однакову частоту та фазу → можливість фазового аналізу;
- 2) монохроматичним: лазер випромінює одну довжину хвилі  $\lambda$  → чіткість сигналу;
- 3) колімованим: лазерний промінь залишається вузьким на великих відстанях, що зменшує розсіювання та втрати енергії;

4) низько розбіжним: промінь зберігає форму на великій відстані;

5) інтенсивним: лазери випромінюють потужне світло, яке дозволяє долати атмосферні втрати та досягати точного вимірювання навіть у складних умовах, таких як велика відстань або низька освітленість.

Взаємодія випромінювання з поверхнею: при падінні лазерного променя на об'єкт, відбувається відбиття згідно з законом:  $\theta_{\text{падіння}} = \theta_{\text{відбиття}}$ . Світловий імпульс від лазера прямує до об'єкта, відбивається і повертається до приймача, який фіксує момент прибуття світлового сигналу. Важливо враховувати: коефіцієнт відбиття – залежить від матеріалу поверхні; кут падіння/відбиття – впливає на траєкторію променя; поглинання – частина енергії може втрачатись.

### 1.5.2 Фактори похибки

У таблиці 1.1 наведено основні фактори що впливають на точність вимірювання Lidar.

Таблиця 1.1 – Похибки вимірювання

| Джерело похибки        | Формула/Модель   |
|------------------------|--|
| Зовнішнє світло        | $I_{\text{паразитне}} \rightarrow$ шум (небажаний внесок в загальний сигнал) |
| Розсіяння в повітрі    | $\Delta D \sim e^{-k \cdot L}$   |
| Вібрації/зсуви об'єкта | Динамічні похибки  |
| Нелінійність детектора | Систематична похибка $\Delta D_{\text{сист}}$                                |
| Мультипутеве відбиття  | Множинні відбиття $t_i \rightarrow t_{\text{фальшиве}}$                      |

На загальну точність вимірювання потужності лазерного випромінювання впливають також фактори:

1) залежність чутливості датчика від довжини хвилі. Усі датчики, що використовуються для вимірювання потужності в вимірювачах потужності лазерного випромінювання, є абсорберами, які не мають абсолютно плоску спектральну характеристику, тобто їх коефіцієнт поглинання залежить від

довжини хвилі. З цієї причини вимірювальні датчики зазвичай потребують калібрування на більш ніж одній довжині хвилі. Неправильна калібровка лазерної системи може приводити до не точних вимірювань;

2) лінійність датчика вимірювача потужності. Лінійність вимірювачів потужності лазерного випромінювання завжди вказується в опублікованій специфікації для теплових і піроелектричних датчиків, а очікувана невизначеність через нелінійність повинна бути додана до основної невизначеності калібрування. Лінійність датчика — це ступінь наближення функції перетворення датчика до прямої лінії. Для аналого-цифрового перетворення сигналу необхідна пряма пропорційна залежність між вихідним значенням перетворювача і фізичною величиною на вході датчика, тому лінійність датчика є дуже важливим параметром. Якщо функція перетворення датчика є істотно нелінійною, то необхідне додаткове перетворення вихідного сигналу датчика, щоб лінеаризувати канал вимірювання в цілому;

3) зовнішні умови можуть сприяти похибкам у вимірюванні: ранадто яскраве світло (сонце) може засліпити приймач; туман або дощ розсіюють пром;

4) внутрішні похибки такі як: нестабільність генератора імпульсів; шуми в сенсорі; похибки обробки сигналу [4].

## 2. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ БЕЗПЛОТНИХ СИСТЕМ

### 2.1 Застосування в промисловості

Лазерні далекоміри – це інноваційні прилади, які знайшли широке застосування у різних сферах, починаючи від будівництва та геодезії та закінчуючи військовими діями та метеорологією. Застосування лазерної далекометрії є надзвичайно широким. У будівництві вона використовується для точного визначення відстаней, висот, площ і об'ємів приміщень. Це дозволяє підвищити ефективність та точність проектних робіт.

У геодезії лазерні далекоміри дозволяють швидко знімати координати місцевості, що значно прискорює процес створення карт. Великі можливості відкриваються перед лазерною технікою в біології й медицині. Лазерний промінь використовується не тільки в хірургії (наприклад, при операціях на сітківці ока) як скальпель, але й у терапії. Швидко розвиваються методи лазерної локації й зв'язку. Локація Місяця за допомогою рубінових лазерів і спеціальних кутових відбивачів, доставлених на Місяць, дозволила збільшити точність виміру відстаней від Землі до Місяця до декількох см. Отримано гарні результати в цілеспрямованому стимулюванні хімічних реакцій. За допомогою лазерної техніки інтенсивно розробляються оптичні методи обробки, передачі й зберігання інформації, методи голографічного запису інформації, кольорове проєкційне телебачення. У промисловості лазерні технології використовують для прошивання отворів, різання, зварювання, модифікування, програмованого термомодеформування, маркування та гравіювання, балансування, вирощування тримірних виробів, текстурування мікрорельєфу поверхні, поверхневого очищення тощо. Однією з якісно нових наукоємних технологій, що широко впроваджуються у виробництво, є лазерні технології, які базуються на використанні електромагнітного випромінювання, створюваного оптичними генераторами – лазерами. Сфери застосування лазерного випромінювання дуже різноманітні: матеріалобробка, вимірювання і контроль в технологічних процесах, мікроелектроніка та мікрооптика, локація та навігація, маркування

матеріалів і виробів, поверхневе очищення, оптичний зв'язок та волоконні технології, адитивні технології, медицина, голографія, реставрація художніх виробів і т. д. [5, 6].

Лазери застосовують для наукових і дослідницьких місій в космосі, за допомогою яких є можливість передавати терабайти важливих даних. Лазерний зв'язок використовує невидиме інфрачервоне світло для надсилання та отримання інформації з вищою швидкістю передачі даних, надаючи космічним апаратам можливість надсилати більше даних на Землю за одну передачу, що прискорює процес роботи з отриманою інформацією для дослідників. «TeraNet» Університету Західної Австралії, мережа оптичних наземних станцій, що спеціалізуються на високошвидкісному космічному зв'язку, успішно прийняла лазерні сигнали від німецького супутника на низькій навколоземній орбіті. Цей прорив відкриває шлях до збільшення пропускної здатності зв'язку між космосом і Землею в 1000 разів. Команда TeraNet під керівництвом доцента Саші Шедіві з вузла UWA в Міжнародному центрі радіоастрономічних досліджень (ICRAR) отримала лазерні сигнали від OSIRISv1, лазерного комунікаційного корисного навантаження від Інституту зв'язку та навігації Німецького аерокосмічного центру (DLR). OSIRISv1 встановлено на супутнику Flying Laptop Штутгартського університету. Сигнали були виявлені за допомогою двох оптичних наземних станцій TeraNet під час прольотів супутника. Ця демонстрація є першим вирішальним кроком у створенні мережі космічного зв'язку наступного покоління по всій Західній Австралії. Наступні кроки включають приєднання цієї мережі до інших оптичних наземних станцій, які зараз розробляються в Австралії та по всьому світу. Наземні станції TeraNet використовують лазери замість традиційних бездротових радіосигналів для передачі даних між супутниками в космосі та користувачами на Землі. Лазери потенційно можуть передавати дані зі швидкістю тисячі гігабіт на секунду, оскільки лазери працюють на набагато вищих частотах, ніж радіо, тому за кожну секунду можна передавати набагато більше даних.

Бездротова радіотехнологія використовується для зв'язку з космосу з моменту запуску першого супутника, «Супутник-1», майже 70 років тому, і з того

часу ця технологія залишилася відносно незмінною. Оскільки кількість супутників у космосі зростає, і кожен новий супутник здатний генерувати більше даних, зараз існує критичне космічне вузьке місце в доставці даних назад на Землю. Лазерний зв'язок ідеально підходить для вирішення цієї проблеми, але недоліком є те, що лазерні сигнали можуть перериватися хмарами та дощем. Команда TeraNet пом'якшує цей недолік, створюючи мережу з трьох наземних станцій, розташованих по всій Західній Австралії. Це означає, що якщо на одній наземній станції хмарно, супутник може завантажити свої дані на іншу з ясним небом. Високошвидкісний лазерний зв'язок з космосу революціонує передачу даних для супутників спостереження за Землею, значно покращить та забезпечить безпеку військових комунікаційних мереж, а також посилить безпечні дистанційні операції для таких секторів, як автономні гірничодобувні роботи, а також національне планування та реагування на стихійні лиха. TeraNet підтримуватиме численні міжнародні космічні місії, що працюють між низькою навколосемною орбітою та Місяцем, використовуючи як перевірені звичайні стандарти оптичного зв'язку, так і більш передові оптичні технології, включаючи зв'язок у глибокому космосі, надшвидкісний когерентний зв'язок, квантово-захищений зв'язок, а також оптичне позиціонування та синхронізацію [7].

## 2.2 Застосування у навігації

Не менш важливою є роль лазерної далекометрії у військовій сфері та навігації. Вона дозволяє точно визначати відстань до цілей, що є критично важливим для артилерії, танків, авіації та снайперських систем. Також лазерні далекоміри використовуються у дронах для орієнтації в просторі та уникнення перешкод. Завдяки мініатюризації та вдосконаленню електроніки, сучасні лазерні далекоміри стали доступнішими та зручнішими у використанні. Вони мають невеликі розміри, автономне живлення, цифрові екрани та можливість збереження вимірювань.

### 2.2.1 Загальна схема лазерної локації

Узагальнена схема лазерної локаційної системи (ЛЛС) на якій базується навігація включає джерело лазерного випромінювання і приймач (розташовані в загальному випадку в різних точках простору), об'єкт локації (спостереження), середовище поширення і джерела перешкод ( рис. 2.1).

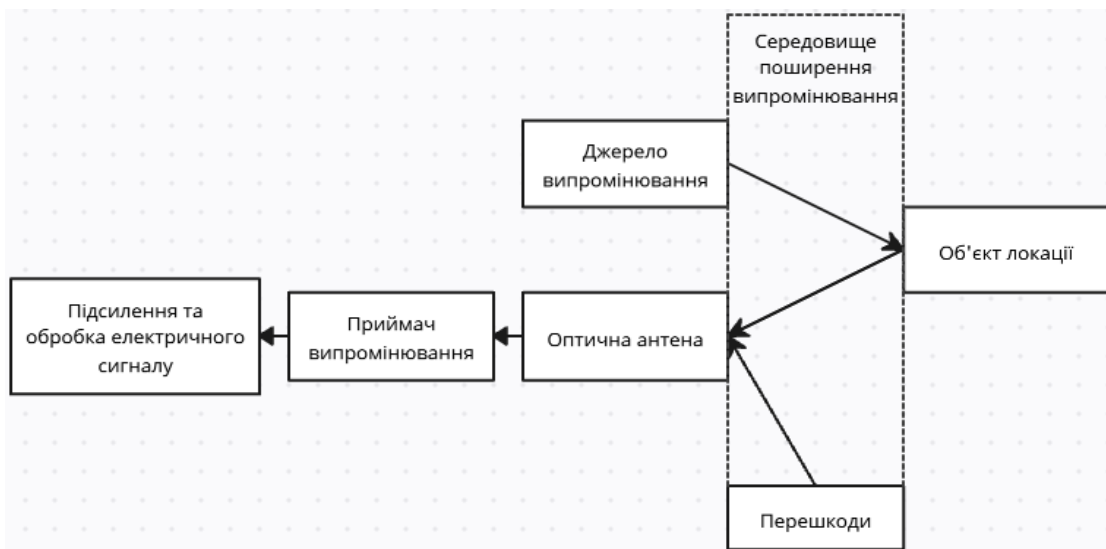


Рисунок 2.1 – Загальна схема ЛЛС

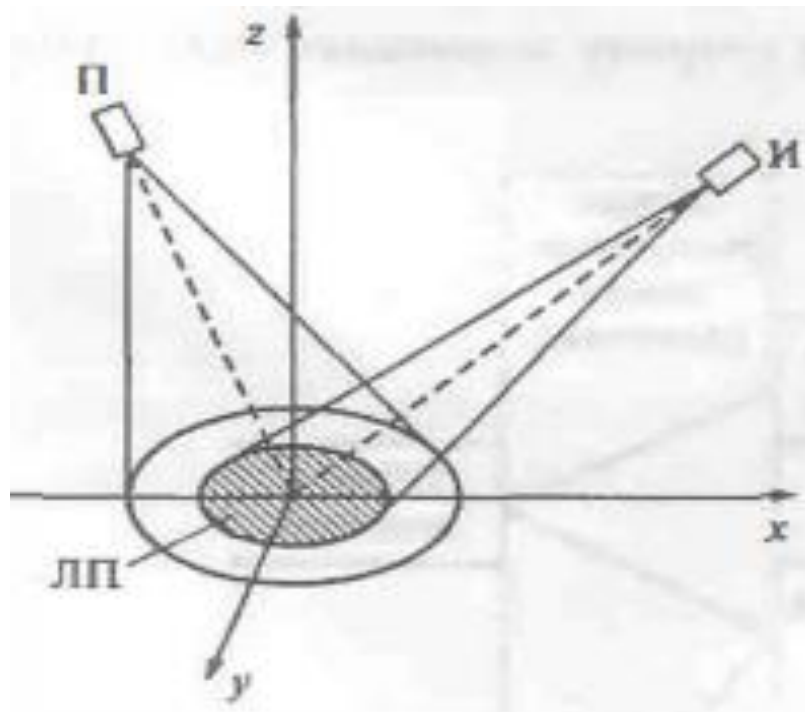
Відповідно до цієї схеми лазерне випромінювання джерела проходить через середовище поширення випромінювання (шар земної атмосфери), послаблюється в ній (в основному внаслідок поглинання атмосферними газами та розсіювання на частинках аерозолі) та потрапляє на об'єкт локації. Частина лазерного випромінювання відбивається об'єктом локації у напрямі (у бік приймача випромінювання лазерного локатора). Відбитий сигнал уловлюється приймальною оптичною антеною і за допомогою приймальної оптики збирається і направляється на приймач випромінювання (фотоприймач), який перетворює його на електричний сигнал, пропорційний інтенсивності прийнятого лазерного випромінювання. Далі цей сигнал піддається посиленню та відповідній обробці з метою вилучення інформації про дальність до об'єкта локації, його кутових координатах і т.д. При цьому, щоб витягти необхідну інформацію про об'єкт

локації, необхідно використовувати спеціальні методи вимірювання та алгоритми обробки, так як значення лазерного сигналу, що реєструється приймачем лазерного локатора, складним чином залежить від характеристик земної атмосфери на трасі поширення випромінювання, що відображають властивостей об'єкта локації, параметрів джерела та приймача випромінювання. У загальному випадку процес виявлення лазерного сигналу та вимірювання його параметрів відбувається на тлі різного роду оптичних перешкод (розсіювання, фонових) в умовах, коли корисний сигнал значно ослаблений та спотворений через вплив середовища розповсюдження випромінювання.

### 2.2.2 Геометричні схеми лазерної локації

Відповідно до розташування в лазерному локаторі джерела та приймача випромінювання, існують дві основні геометричні схеми лазерної локації - бістатична та моностатична.

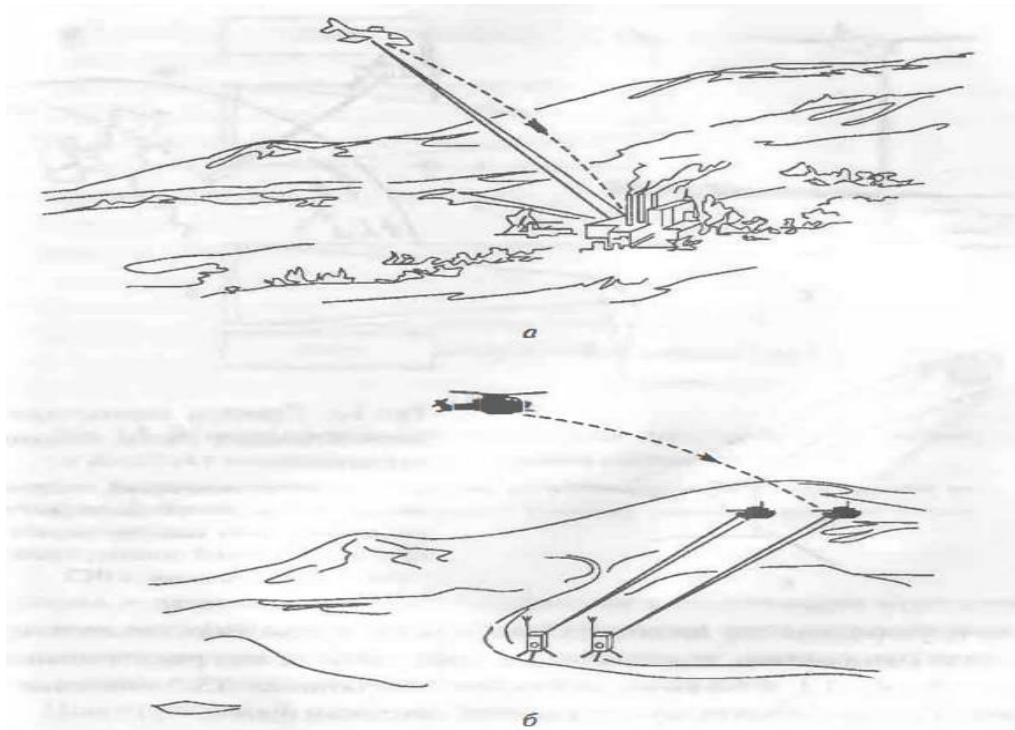
У бістатичній схемі локації рознесені на помітну відстань або конструктивно (наприклад, у системах наведення та супроводження), або для того, щоб досягти гарного просторового розширення (наприклад, при дистанційному лазерному зондуванні). При роботі лазерного локатора за бістатичною схемою лазерної локації поверхні джерело  $I$ , розташоване в точці  $(X_i, Y_i, Z_i)$  земної системи координат  $x, y, z$ , опромінює деяку ділянку поверхні (земної, морської або штучного об'єкта). Розсіяне поверхнею випромінювання реєструється приймачем  $II$ , розташованим у точці  $(X_{II}, Y_{II}, Z_{II})$  земної системи координат.



И-Джерело; П-Приймач; ЛП-лазерна область підсвічування.

Рисунок 2.2 – Бістатична схема лазерної локації

На рисунку 2.3 показані приклади використання бістатичної схеми локації у військових цілях для високоточного наведення ракет, бомб та снарядів. На рис. 2.3, а представлена напівактивна ЛЛС наведення, в якій лазерне підсвічування об'єкта локації здійснюється з борту літака. Льотчик здійснює пошук, розпізнавання, вибір об'єкта, прицілювання, переведення лазерної станції підсвічування в режим випромінювання. Наведення лазерного променя та утримання його на об'єкті виконується за допомогою спеціального прицілу (оптичного, телевізійного, інфрачервоного чи радіолокаційного). На рис. 2.3, б показана аналогічна напівактивна ЛЛС наведення, в якій підсвічування об'єкта здійснюється з наземного пункту.



- a* – підсвічування об'єкта локації здійснюється з борту літака;  
*б* – підсвічування об'єкта локації здійснюється з наземного пункту.

Рисунок 2.3 – Приклади використання бістатичної схеми лазерної локації

У моностатичній схемі локації джерело та приймач випромінювання конструктивно встановлюються в одному місці.

На рисунку 2.4 наведено приклади використання моностатичної схеми локації. На рис. 2.4, а показаний бортовий літаковий лазерний локагор, призначений, наприклад, для визначення висоти літака над морською поверхнею, вимірювання параметрів морського хвилювання або контролю нафтових забруднень на морській поверхні; на рис. 2.4, б – лазерний альтиметр встановлений на космічному апараті, а на рис. 2.4, в – наземний лазерний локагор, призначений для стеження за штучними супутниками Землі (ШСЗ). Моностатична схема локації з поєднаними джерелом і приймачем випромінювання використовується також, наприклад, у лазерних далекомірних системах та лазерних системах дистанційного зондування атмосфери за допомогою спеціальних приладів, що здатні реєструвати електромагнітне випромінювання, відбите від атмосфери Цей

метод дозволяє отримувати інформацію про атмосферні параметри, такі як температура, вологість, склад та оптичні властивості. При цьому лазерне джерело та приймач випромінювання часто встановлюються на єдиному поворотному пристрої, який дозволяє змінювати напрямок променя в залежності від місцезнаходження об'єкта локації.

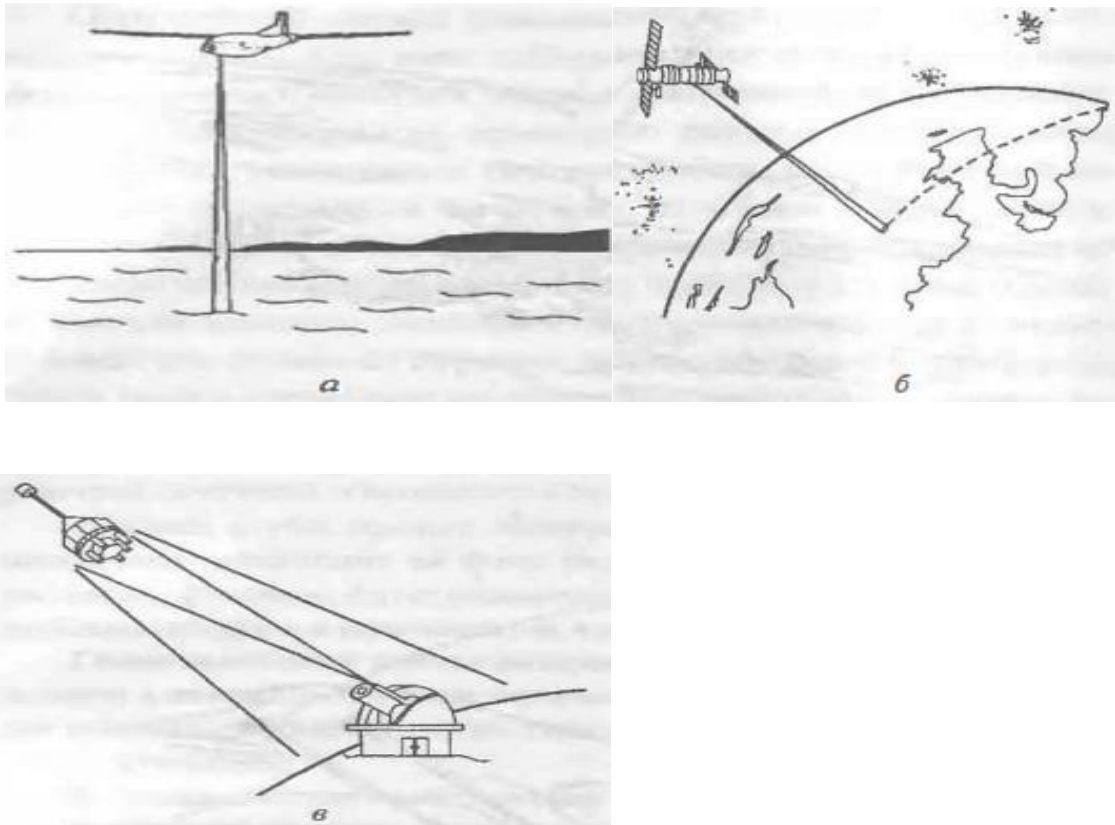


Рисунок 2.4 – Приклади використання моностатичної схеми лазерної локації

Моностатичний лазерний локатор із поєднаними джерелом та приймачем випромінювання може мати як коаксіальне, так і біаксіальне розташування оптичних осей джерела та приймача. У коаксіальній системі оптична вісь лазерного пучка джерела випромінювання збігається з оптичною віссю приймача. Можливі типи оптичної схеми моностатичного лазерного локатора при коаксіальній конфігурації осей показано на рисунку 2.5 [8].

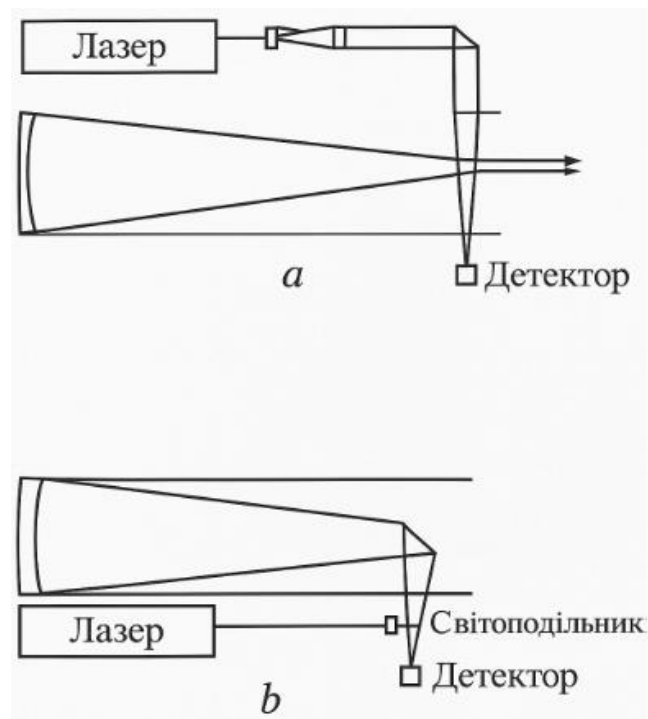


Рисунок 2.5 – Можливі типи оптичної схеми моностатичного лазерного локатора з коаксіальною конфігурацією оптичних осей

В оптичній схемі, представлений на рис. 2.5, а відбувається роздільне поширення променя лазерного джерела і прийнятого випромінювання, а в схемі, зображеної на рис. 2.5, б, промінь лазерного джерела відбивається від дзеркала приймальної оптичної системи (тобто лазерний пучок джерела випромінювання формується головним дзеркалом приймальної оптичної системи).

У біаксіальній системі лазерний пучок входить у поле зору приймача тільки на деякій, заздалегідь визначеній відстані (рис. 2.6).

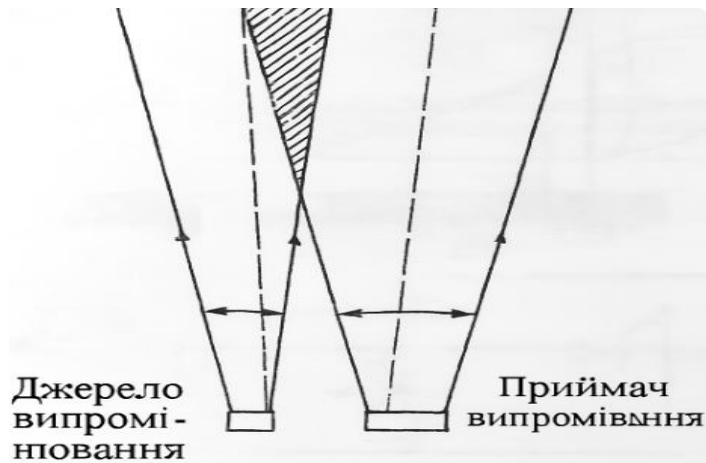


Рисунок 2.6 – Моностатичний лазерний локатор з біаксіальною конфігурацією оптичних осей

Така схема розташування оптичних осей джерела випромінювання і приймача дозволяє уникнути насичення фотодетектора приймача, викликаного зворотним розсіюванням випромінювання (на атмосферному аерозолі) в ближній зоні локатора [8].

### 2.2.3 Об'єкти локації

Об'єкти локації надзвичайно різноманітні та визначаються завданнями, для яких призначені конкретні ЛЛС. Об'єктами локації можуть бути:

1) ділянки земної або морської поверхні (наприклад, для лазерних далекомірів або бортових лазерних висотомірів, встановлених на авіаційних чи космічних носіях);

2) ШСЗ, Місяць (для ЛЛС, встановлених, наприклад, на поверхні Землі або на борту космічних апаратів), планети Сонячної системи (для ЛЛЗ, встановлених на борту космічних апаратів, запускених до цих планет);

3) різні штучні об'єкти складної форми (наприклад, для лазерних систем наведення - літаки, вертольоти, кораблі, автомашины об'єкти військової техніки, будівлі та різні споруди);

4) спеціально встановлені дзеркальні або штовхальні відбивачі (для лазерних локаційних вимірювальних систем різного призначення, наприклад, для лазерних систем дальнометрії) і т.п. [8]

#### 2.2.4 Оптичні перешкоди

У ЛЛС прийом сигналу завжди здійснюється на тлі шуму, який можна поділити на зовнішній та внутрішній. Зовнішні шуми більшості ЛЛС переважно зумовлені впливом перешкоди, викликані зворотним розсіянням лазерного випромінювання у земної атмосфері і фоновими перешкодами. Перешкода зворотного розсіювання виникає в наслідок зворотного об'ємного розсіювання лазерного пучка підсвічування в товщі атмосфери. До фонових перешкод відносять перешкоди, які пов'язані з випромінюванням джерела лазерного локатора, а існують незалежно від лазерного сигналу. До них можна віднести пряме сонячне випромінювання і фонове випромінювання, обумовлене розсіюванням сонячного випромінювання в земній атмосфері і на земній поверхні. Ці перешкоди у часто є визначальними під час роботи локатора вдень. Внутрішні шуми обумовлені шумами фотоприймача та шумами підсилювального пристрою [8].

### 3 БЕЗПЛОТНІ СИСТЕМИ

#### 3.1 Lidar в безпілотних автомобілях

Актуальна проблема і використання лазерних далекомірів сьогодні дуже поширене. Одна із галузей, де необхідно використовувати лазерні далекоміри – транспорт, а саме в автомобілях. Час, коли автомобілі будуть оснащуватись автопілотами і їздити без участі водія вже близько. А щоб безпечно рухатись по дорозі, автомобілю необхідно знати інформацію про відстань до об'єктів навколо нього і правильно приймати рішення про подальший рух автомобіля. Для цього і використовуються лазерні далекоміри.

В безпілотних автомобільних системах використовується Lidar. У датчику використовуються електромагнітні хвилі інфрачервоного діапазону, за допомогою яких визначається відстань до об'єкту попереду, а також його швидкість. Коротко зупинемось на принципі роботи далекоміру, а саме на одному з варіантів приладу. Конструкція автомобільного лідара включає наступні елементи: передавач, модулятор, приймач, оптичний елемент, підсилювач, АЦП (аналогово-цифровий перетворювач) і мікропроцесор.

Роль передавача виконує лазерний діод, який служить для передачі інфрачервоного (ІЧ) випромінювання. ІЧ випромінювання модулюється в модуляторі, який при необхідності змінює його інтенсивність. Залежно від типу модуляції розрізняють лідари безперервного і імпульсної дії. Більш досконала імпульсна модуляція ІЧ випромінювання, так як вона більш точна і швидкодіюча. Для підвищення ефективності вимірювань застосовується багатоімпульсна технологія (передача декількох імпульсів одночасно).

Принцип роботи далекоміру у безпілотних системах такий. Світловий імпульс, а потім і його відображення проходять через оптичний елемент. Відбитий імпульс приймається фотодіодом, де перетворюється в електричний сигнал. Далі сигнал підсилюється підсилювачем, перетворюється в цифровий сигнал за допомогою АЦП, а потім обробляється мікропроцесором. На основі прийнятого цифрового сигналу процесор визначає відстань до транспортного засобу попереду

і його швидкість. Після чого автопілот може приймати необхідні рішення напрямку руху автомобіля. Також, якщо задати граничну швидкість зміни відстані до об'єкта попереду і задати необхідні дії, при перевищенні цього значення, можна навчити автопілот швидко реагувати на екстрені ситуації на дорозі, що підвищить його рівень безпечного керування транспортним засобом. Деякі автомобілі використовують інфраструктурні системи (які, наприклад, можуть бути вбудовані в дорогу чи біля неї), однак більш новітні технології дозволяють симулювати присутність людини на рівні прийняття рішень про керування і швидкість автомобіля завдяки набору камер, сенсорів, радарів і систем супутникової навігації.

Незважаючи на те, що деталі конструкції відрізняються, більшість автономних систем створюють і підтримують внутрішню карту свого оточення на основі широкого спектру датчиків, як-от радар або LIDAR (рис. 3.1). Безпілотні прототипи Uber використовують 64 лазерні промені разом з іншими датчиками для створення внутрішньої карти. Прототипи Google на різних етапах використовували лазери, радари, потужні камери та гідролокатори [9].



Рисунок 3.1 – Загальне використання датчиків автономних систем

Потім програмне забезпечення обробляє ці вхідні дані, прокладає маршрут і надсилає інструкції до систем автомобіля, які контролюють прискорення,

гальмування та рульове керування. Жорстко закодовані правила, алгоритми уникнення перешкод, прогнозне моделювання та «розумне» розпізнавання об'єктів (наприклад, різниці між велосипедом і мотоциклом) допомагають програмному забезпеченню дотримуватися правил дорожнього руху та долати перешкоди. Частково автономні транспортні засоби можуть вимагати втручання людини-водія, якщо система стикається з невизначеністю, а повністю автономні транспортні засоби можуть навіть не мати керма. Крім того, автономні автомобілі можна розрізняти як «підключені» чи ні, з огляду на те, чи можуть вони взаємодіяти з іншими транспортними засобами та/або дорожньою інфраструктурою, такою як світлофори нового покоління.

Розробники використовують різноманітні методи та підходи, все більш просунуті технології та більш якісні комплектуючі для створення прототипів безпілотних авто. Але більшість з них мають багато спільного, бо принцип один – створити транспортний засіб, який би не тільки керував процесом водіння, але й відслідковував ситуацію на дорозі та приймав правильні рішення. Ось деякі з найважливіших технологій:

Датчики: для сприйняття навколишнього середовища в безпілотних автомобілях зазвичай використовується комбінація датчиків, таких як лідар (виявлення світла та визначення дальності), радар, камери та ультразвукові сенсори.

Карти: карти високої чіткості відіграють вирішальну роль. Ці карти містять детальну інформацію про дорогу, дорожні знаки та інші елементи дорожньої інфраструктури, які допомагають транспортному засобу орієнтуватися.

Системи керування: автомобілі використовують складні системи керування у режимі реального часу, регулюючи швидкість, кермування і гальмування за потреби.

Машинне навчання та штучний інтелект: передові алгоритми штучного інтелекту використовуються для обробки даних від датчиків, прийняття рішень і вивчення досвіду. Глибоке навчання часто використовується для розпізнавання зображень і шаблонів.

У більшості методів створення безпілотних систем автомобілів якраз таки використовуються лазерні далекоміри які грають важливу роль у створенні та вдосконаленні автономних систем [9].

### 3.2 Lidar в безпілотних літальних апаратах

Дрон - це безпілотний (безекіпажний) літальний (повітряний), водний чи наземний апарат, здатний пересуватися самостійно за задалегідь заданим алгоритмом, без управління людиною. Дрон програмується на виконання завдань за задалегідь заданими алгоритмами. Дронами можна назвати безпілотні автомобілі, роботехнічні комплекси (роботи-сапери, роботи-розвідники). До дронів відносяться всі безпілотники - квадрокоптери (мультикоптери), літаки (БПЛА), наземні платформи (танки, машини, роботи), човни, безекіпажні морські катери із запрограмованими діями чи зі штучним інтелектом.

Для практичного застосування та розробки БПЛА важливим є дослідження питання їх класифікації. Основними класифікаційними ознаками є: за типом системи управління, за масою, за масштабом завдань, за паливною системою, за типом крила, за тривалістю польоту, за типом літального апарату, за кількістю використань, за радіусом дії, за максимальною швидкістю польоту, за кількістю двигунів, за використанням, за напрямком підйому/посадки, за типом підйому/посадки, за часом одержання зібраної інформації. Тип системи управління визначає вид БПЛА.

За типом управління безпілотники поділяються на GPS і FPV дрони. GPS дрони найчастіше використовуються для реалізації стабілізованої аерозйомки. Такі моделі доходять до споживача в повній, готовій до польоту з коробки комплектації (дрон + пульт + АКБ + ЗУ). Завдяки автоматичним функціям експлуатація GPS дронів максимально проста і не вимагає від користувача особливих навичок пілотування. Потенціал GPS дронів завжди обмежений електронікою, як у потужності, так і в управлінні, що в цілому визначає їх вузьке призначення (аерозйомка/картографія/моніторинг/пошук та порятунок). FPV

дрони, що стрімко набирають популярність, — повна протилежність GPS дронам. Такі БЛА використовуються для реалізації вільного динамічного польоту в режимі від першої особи. Згадана свобода польоту стає доступною завдяки відсутності у FPV дронів будь-яких електронних обмежень, як у потужності, так і в управлінні. В ідеалі такі дрони збираються та налаштовуються користувачем з нуля з урахуванням особистих переваг.

### 3.2.1 Lidar сканер у БПЛА

Сканер БПЛА LIDAR – це тип технології дистанційного зондування, який використовує виявлення світла та визначення дальності (LIDAR), встановлений на безпілотному літальному апараті (БПЛА), для збирання тривимірних даних поверхні Землі. Це 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. Лідар як прилад являє собою, як мінімум, активний далекомір оптичного діапазону. Скануючи, лідари в системах машинного зору формують двовимірну або тривимірну картину навколишнього простору. «Атмосферні» лідари здатні не тільки визначати відстані до непрозорих цілей, що відбивають світло, а й аналізувати властивості прозорого середовища, що розсіює світло. Різновидом атмосферних лідарів є доплерівські лідари, що визначають напрямок і швидкість переміщення повітряних потоків в різних шарах атмосфери.

Інноваційне рішення від Leica Geosystems: BLK2FLY – перший у світі повністю інтегрований БПЛА з технологією LiDAR (рис. 3.2). Це самостійний літаючий лазерний сканер із удосконаленою функцією обходу перешкоди, для зручного захоплення реальності з висоти. Він призначений для зйомки екстер'єрів будівель, конструкцій та навколишнього середовища, створюючи хмару точок під час роботи. Сканер випромінює лазерні імпульси на землю та вимірює час, необхідний для повернення світла, що дозволяє створювати докладні топографічні карти, цифрові моделі рельєфу та іншу геопросторову інформацію.

Ця технологія широко використовується в різних галузях, таких як сільське господарство, лісове господарство, міське планування та моніторинг навколишнього середовища, завдяки його здатності швидко та точно збирати дані про місцевість зверху.



Рисунок 3.2 – Наглядна ілюстрація роботи Lidar сканеру БПЛА

Сканери LiDAR для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) мають широкий спектр застосувань у різних галузях. Ці високотехнологічні пристрої широко використовуються у топографічному картографуванні, землеустрої, управлінні лісовим господарством, обстеженні інфраструктури та моніторингу довкілля. Сканер БПЛА LiDAR може швидко та точно збирати дані з важкодоступних чи небезпечних зон, надаючи докладні 3D-моделі та хмари точок для аналізу та прийняття рішень (рис. 3.3). Ця технологія справила революцію у тому, як професіонали в таких галузях, як сільське господарство, міське планування, археологія та реагування на стихійні лиха збирають важливу інформацію, заощаджуючи час та ресурси, одночасно підвищуючи ефективність та точність.

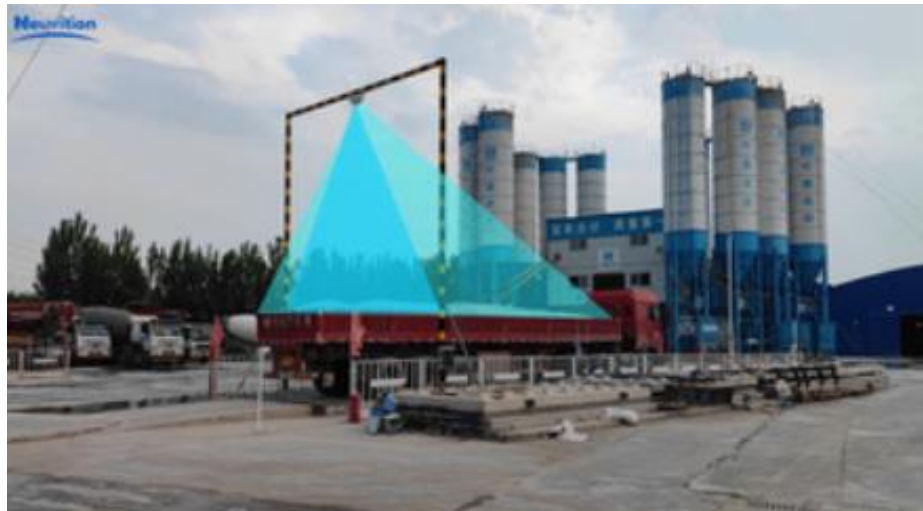


Рисунок 3.3 – Приклад використання Lidar сканеру БПЛА

Переваги сканерів LiDAR для БПЛА численні та значні. По-перше, вони надають точні тривимірні картографічні дані з високою роздільною здатністю, що дозволяють проводити детальний аналіз місцевості, структур та рослинності. Ці дані можна використовувати в різних галузях, таких як сільське господарство, будівництво, лісове господарство та міське планування, для покращення процесів прийняття рішень та підвищення ефективності. Крім того, сканери БПЛА LiDAR є економічно ефективними та економлять час у порівнянні з традиційними методами зйомки, оскільки вони можуть швидко охопити великі території та з мінімальним втручанням людини. Загалом використання сканерів LiDAR з БПЛА пропонує потужний інструмент для отримання точної та цінної геопросторової інформації для широкого спектру додатків. NeuViewer – це програмна система управління, обробки даних та відображення хмар точок Neuvition LiDAR. Дозволяє як встановлювати Lidar параметри так і відображати бачення з Lidar сканеру в реальному часі, але для цього необхідно підключити Neuvition Lidar до веб-клієнту NeuViewer (рис. (3.4, 3.5)) [10].

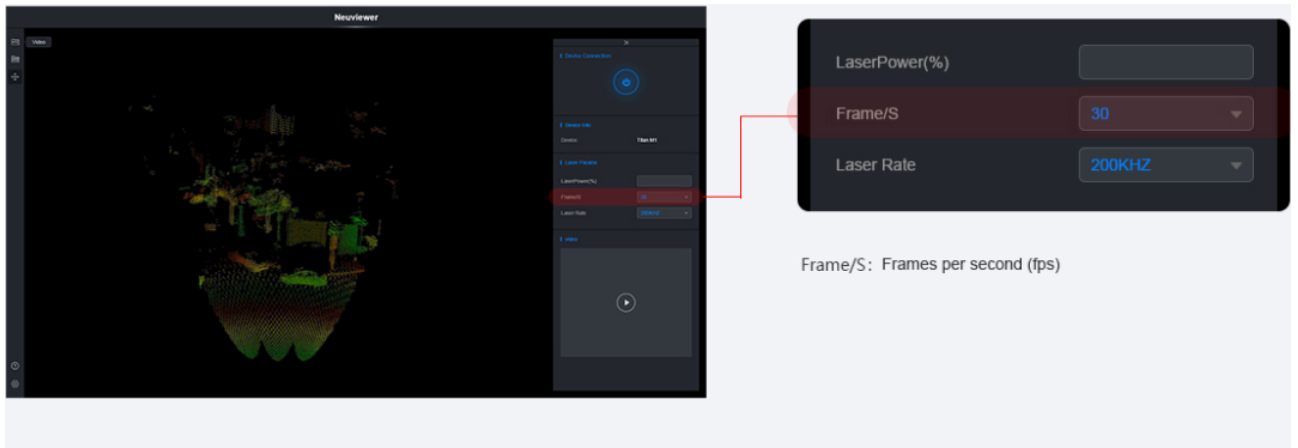


Рисунок 3.4 – Наглядна ілюстрація змінних характеристик Lidar

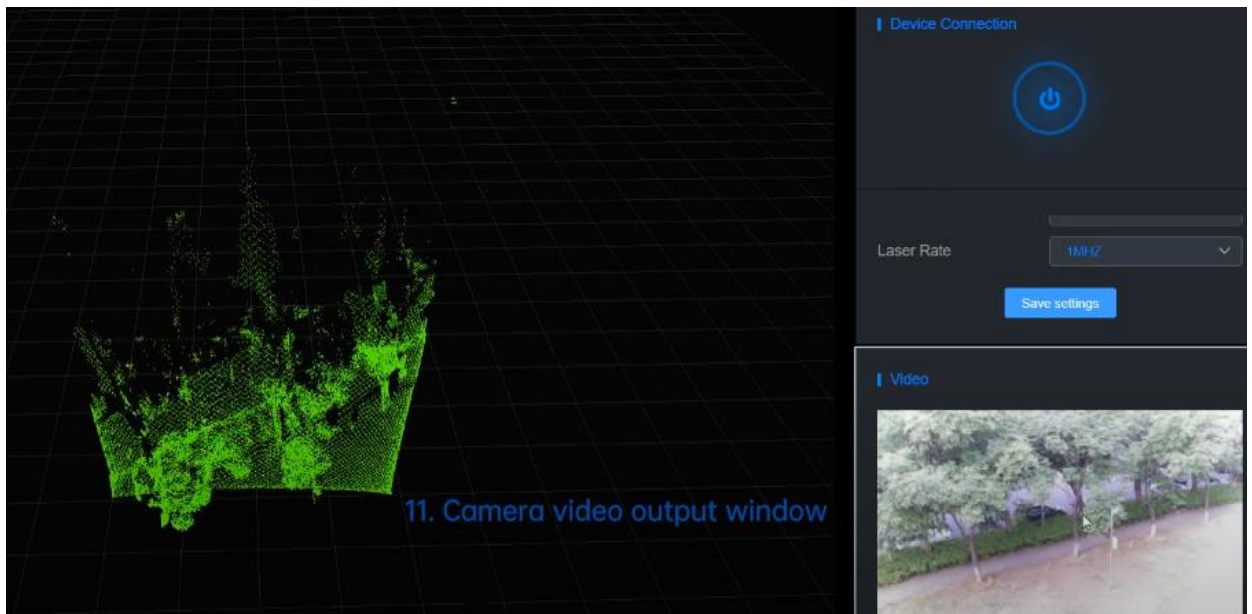


Рисунок 3.5 – Наглядна ілюстрація бачення з Lidar сканеру в реальному часі

## ВИСНОВКИ

Лазерна далекометрія ґрунтується на фундаментальних фізико-математичних принципах, зокрема поширенні світла, відбитті променів та точному вимірюванні часу або фази сигналу. У ході аналізу було встановлено, що точність визначення відстані залежить як від фізичних характеристик середовища (температури, вологості, тиску), так і від параметрів самого приладу — зокрема, роздільної здатності таймера та властивостей лазерного випромінювання. Отже, глибоке розуміння фізико-математичних основ є ключовим для ефективного використання лазерних далекомірів у практичних задачах.

Практична реалізація безпілотних систем вимагає комплексного підходу, що поєднує сучасні досягнення в галузі електроніки, програмного забезпечення, сенсорних технологій та систем управління. Основними аспектами створення ефективної безпілотної платформи є вибір конструкції, інтеграція систем навігації та позиціонування, стабільна робота сенсорів, а також можливість автономного прийняття рішень. Успішне впровадження таких систем залежить не лише від апаратної складової, а й від точного налаштування алгоритмів керування, адаптації до змін навколишнього середовища та забезпечення надійного зв'язку між елементами системи. Таким чином, практична реалізація безпілотних систем демонструє великий потенціал і динамічний розвиток, відкриваючи широкі можливості для автоматизації й оптимізації процесів у різних галузях. Лазерні технології значно підвищують інтелектуальні, навігаційні та бойові можливості безпілотних систем, сприяючи подальшій автономізації та розширенню сфер їх застосування.

Безпілотні системи автомобілів і літальних апаратів є результатом інтеграції сучасних технологій – сенсорики, штучного інтелекту, систем навігації та автоматичного керування. Їх розвиток спрямований на підвищення безпеки, ефективності та автономності у транспортних і логістичних процесах.

У безпілотних автомобілях основна увага зосереджена на точному розпізнаванні об'єктів, адаптації до дорожніх умов і взаємодії з інфраструктурою.

У безпілотах – на стабілізації польоту, навігації в просторі та виконанні завдань у складних або небезпечних умовах. Обидві системи мають спільну мету – зменшення впливу людського фактора і підвищення ефективності управління. Практична реалізація таких технологій відкриває нові можливості для транспорту, охорони, сільського господарства, військової справи та багатьох інших галузей. Таким чином, безпілотні системи становлять важливий крок у напрямку повної автоматизації та цифровізації майбутнього.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Лазаренко К., & Чиж, І. (2022). Принципи дії та сучасні засоби оптичної далекометрії // *Measuring And Computing Devices In Technological Processes*. 2022. № 4. Р. 18–32. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-2> (дата звернення 13.05.2025).
2. Козаченко М.Т., Жмурко Ю.В., Козаченко Л.О., Зіангірова Л.Т., Богун В.Д., Серебрін В.Л. Вимірювання в системах зв'язку: методичне керівництво. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2012. 86 с.
3. Курський Ю. С., Гнатенко О.С. Система для виявлення оптичних приладів, заснована на уявленнях фрактальної математики. // *Метрологія та прилади*. 2021. № 1(87). С. 14–18.
4. Колобродов В. Г., Сокол В. П. Фактори впливу на точність вимірювання потужності лазерного джерела випромінювання // XXII Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи», 16-17 травня 2023 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна. С. 63–63.
5. Yu. P. Machehin, Yu. S. Kurskoy, A. S. Gnatenko 2018 Physical and mathematical foundations of measurements in nonlinear dynamic systems // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77. Issue 18. P. 1631-1637.
6. Лазерні технології у машинобудуванні : навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 109 с.
7. Стаття The University of Western Australia's 'TeraNet' 2024 Мережа оптичних наземних станцій, що спеціалізуються на високошвидкісному космічному зв'язку. TeraNet фіксує лазерні сигнали з німецького супутника.
8. Goldberg B. S., Franz R. W. Laser navigation system and method 2015. URL: <https://patents.google.com/patent/US20150241562A1/en> (дата звернення 02.06.2025).
9. Юрій Світлюк Наукова стаття Безпілотні автомобілі. 2023. URL: [https://root-nation.com/ua/cars-ua/car-articles-ua/ua-self-driving-cars-revolution/#So\\_take\\_bezpilotni\\_avtomobili](https://root-nation.com/ua/cars-ua/car-articles-ua/ua-self-driving-cars-revolution/#So_take_bezpilotni_avtomobili) (дата звернення 02.06.2025).

10. Стаття ScanX 2022 Як бпла зробили революцію у галузі лазерного сканування. [https://scanx.com.ua/article/10\\_2022/5.html](https://scanx.com.ua/article/10_2022/5.html) (дата звернення 02.06.2025).