

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)

РОЗВИТОК МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ
ОПТИЧНОЇ ЛОКАЦІЇ
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи _____ ЛОЕТм-18-1
_____ Антонова В.О.
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми _____ освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо -наукова)

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна
техніка»
(повна назва освітньої програми)

Керівник _____ доц. каф. ФОЕТ Курський Ю.С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

_____ Мачехін Ю.П.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Антоновій Валерії Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розвиток методів та систем оптичної локації

затверджена наказом університету від " 30 жовтня 2019 р. № 1576 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 20 грудня 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи Оптичний локатор, лазерний імпульсний далекомір, похибка вимірювання відстані.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Принцип дії та конструкції оптичних локаційних систем. 2 Виконати аналіз систем ідентифікації зображень. Доповнити оптичну локаційну систему блоком розпізнавання та супроводження цілі.

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

Демонстраційний матеріал – 13 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про оптичні локатори	04.11.19 – 10.11.19	Виконано
2	Дослідження фізичних принципів роботи оптичних локаторів та їх схеми	11.11.19 – 18.11.19	Виконано
3	Виконання розрахунків похибки вимірювання часового інтервалу.	19.11.19 – 25.11.19	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів	26.11.19 – 30.11.19	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	01.12.19 – 06.12.19	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	07.12.19 – 12.12.19	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	13.12.19 – 17.12.19	Виконано
8	Підготовка та захист атестаційної роботи	18.12.19 – 20.12.19	

Дата видачі завдання 03 листопада 2019 р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

доц. каф. ФОЕТ Курський Ю.С

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи 52 с., 14 рис., 2 табл., 7 додаток, 15 джерел.

ОПТИЧНИЙ ЛОКАТОР, ЛОКАЦІЯ, ІМПУЛЬСНИЙ ДАЛЕКОМІР, ЛАЗЕР, ФОТОПРИЙМАЧ, СХЕМА.

Об'єкт дослідження – оптичні локатори – вимірювальні прилади для точного та швидкого заміру відстані.

Мета роботи – дослідити методи та системи для підвищення ефективності оптичної локації.

Метод дослідження – теоретичний.

У першій частині описані принцип дії локатора, схема, види локації, методи лазерної далекометрії.

У другій частині проведено розрахунок похибки визначення дистанції імпульсним далекоміром.

ABSTRACT

The explanatory slip contains (указать какой работы): 52 p., 14 fig., 2 tabl., 7 appendices, 15 sources.

OPTICAL LOCATOR, PULSE RANGE LASER, LASER, PHOTO RECEIVER, SCHEME

The object of study are optical locators, measuring instruments for accurate and quick distance measurement.

The purpose of the work is to investigate methods and systems to increase the efficiency of a location.

The research method is theoretical.

The first part describes the principles of the locator, schemes, types of locations, methods of laser detection and ranging of objects.

In the second part, the calculation of the error in determining of the distance is done by a pulse range laser.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка аттестационной работы 52 с., 14 рис., 2 табл., 7 приложения, 15 источников.

ОПТИЧЕСКИЙ ЛОКАТОР, ИМПУЛЬСНЫЙ ДАЛЬНОМЕР, ЛАЗЕР, ФОТОПРИЙОМНИК, СХЕМА.

Объект исследования – оптические локации – измерительные приборы для точного и быстрого измерения расстояния.

Цель работы – исследовать методы и системы для повышения эффективности локации.

Метод исследования – теоретический.

В первой части описаны принцип действия локатора, схемы, виды локации, методы лазерной дальнометрии.

Во второй части расчет погрешности определения дистанции импульсным дальномером.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	8
Вступ.....	9
1 Огляд і аналіз технічної літератури.....	11
1.1 Основні теоретичні відомості про оптичні локатори.....	11
1.2 Схема та принцип дії оптичного локатора.....	12
1.3. Принцип отримання локаційної інформації.....	13
1.3.1 Активна оптична локація.....	14
1.3.2. Напівактивна оптична локація.....	16
1.3.3. Пасивна оптична локація.....	17
1.4. Загальні особливості оптичного локатора.....	17
1.5. Електрооптичний далекомір.....	18
1.6. Види далекомірів та їх принцип роботи.....	19
1.6.1 Імпульсний метод лазерної дальнометрії.....	19
1.6.2 Фазовий метод лазерної дальнометрії.....	21
1.6.3 Частотний метод дальнометрії.....	22
1.7. Принцип дії імпульсних далекомірів.....	23
1.8 Підвищення точності імпульсних оптичних локаторів.....	24
1.9. Просторова фільтрація сигналу і розпізнання сигналів.....	30
1.9.1.Просторовий фільтр Вандер Люгта.....	32
2 Похибка визначення дистанції імпульсним далекоміром.....	35
2.1 Фактори, що впливають на похибку вимірювання.....	35
2.1.1 Області локалізації похибок.....	35
2.1.2. Оцінювання складових похибки вимірювання дистанції.....	40
2.2. Розрахунок похибки в залежності від тривалості імпульсу.....	41
2.3. Вплив стану атмосфери на похибку визначення дистанції.....	44
2.4. Шляхи підвищення точності визначення дистанції. Двочастотний далекомір.....	46
Висновки.....	50

Перелік джерел посилання.....	51
Додаток А Демонстраційний матеріал	

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ДРІ – дільник рахункових імпульсів;

КВОЛЗ – керована волоконно-оптична лінія затримки;

СДВ – світлодіодний випромінювач;

СУ – схема управління;

ФП – фотоприймач/

ВСТУП

В наш час технічного прогресу, суспільство потребує все більше пристроїв, які допоможуть використати менше трудових ресурсів та досягти найкращих результатів. Лазерні технології – це саме ті технології, для яких є найкращі умови розвитку у нашій державі і які є найнеобхіднішими на даному етапі.

Оптична локація – галузь науки і техніки, що забезпечує отримання відомостей про об'єкти шляхом прийому і аналізу поширюються від них електромагнітних хвиль оптичного діапазону. Аналогічне визначення дається сучасної радіолокації, хоча застосовується в даний час поняття "локація" далеко виходить за історичні склалися термінологічні рамки. Справді, латинське слово "локус" означає місце, а "локація" – визначення місця розташування. Традиційна задача визначення місця розташування об'єкта в будь-який момент часу спостереження залишається першочерговим і важливою завданням локації при використанні хвиль різної фізичної природи, в тому числі і електромагнітних хвиль оптичного діапазону. Розвиток теорії і техніки локації дозволило визначати місце розташування не тільки об'єкта в цілому, а й окремих ділянок його поверхні. Так що розширення поняття "локація" не призводить до неоднозначності його сприйняття. Головним залишається отримання відомостей про об'єкти на відстані.

Об'єкт дослідження – оптичні локатори – вимірювальні прилади для точного та швидкого заміру відстані.

Мета роботи – розвиток систем оптичної локації.

1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПРО СИСТЕМИ ОПТИЧНОЇ ЛОКАЦІЇ

1.1 Основні теоретичні відомості про оптичні локатори

Оптична локація – сукупність методів виявлення, вимірювання координат, а також розпізнавання форми видалених об'єктів за допомогою електромагнітних хвиль оптичного діапазону – від ультрафіолетових до далеких інфрачервоних. Оптична локація дозволяє з високою точністю (до декількох десятків сантиметрів) виробляти картографування земної поверхні, поверхні Місяця, визначати відстань до хмар, літаків, космічних, надводних і підводних (використовуючи зелену ділянку спектра) об'єктів, досліджувати розподіл інверсійних і аерозольних шарів в атмосфері. Основними перевагами оптичних локаторів є велика точність визначення координат об'єктів, висока роздільна здатність, тобто здатність розрізняти два сусідніх рівновіддалених об'єкту.

Практично створення оптичних локаторів з великою дальністю дії, високими точністю і роздільною здатністю стало можливим тільки з появою таких потужних джерел когерентного випромінювання, як оптичні квантові генератори – лазери.

В оптичних локаціях використовуються ті ж принципи визначення координат, що і в радіолокації: оптичний локатор опромінює об'єкт за допомогою передавача і приймає відбите від нього випромінювання за допомогою приймача. Електричний сигнал на виході приймача містить інформацію про параметри лоцируемого об'єкта; характеристики цього сигналу в середньому пропорційні координатам об'єкта. Методи виявлення об'єктів оптичним локатором і визначення їх кутових координат в основному такі ж, як в тепlopеленгації, а методи визначення дальності такі ж, як в радіолокації. Внаслідок квантового характеру взаємодії лазерного випромінювання з детектором приймача і когерентності лазерного

випромінювання методи обробки сигналу в оптичних локаторах є статистичними.

1.2. Схема та принцип дії оптичного локатора

Основні переваги оптичних локаторів перед радіолокаторами - велика точність визначення кутових координат об'єктів (по максимуму відбитого сигналу) і висока роздільна здатність по дальності. Наприклад, при використанні лазерного променя з кутом розбіжності, рівним $10'$, похибка визначення кутових координат об'єкту складає менше $1'$ (у радіолокаторів – $25 - 30'$); при тривалості світлового імпульсу 10 нс дозвіл по дальності може досягати декількох см. Крім того, оптичний локатор володіє високою кутовою роздільною здатністю, тобто здатністю розрізняти два сусідніх рівновіддалених об'єкту, яка обумовлена дуже високою спрямованістю випромінювання. Висока роздільна здатність оптичного локатора дає можливість вирішувати задачу розпізнавання форми об'єктів. Істотний недолік оптичних локаторів – скрутне використання їх в складних метеорологічних умовах (при дощі, тумані, снігу і та ін.) для локації об'єктів на далеких відстанях.

Схема і принцип дії одного з типів оптичного локатора для стеження за авіаційними і космічними об'єктами показані на рис. 1.1 Промінь лазера, пройшовши через коліматор, системою дзеркал прямує на об'єкт. Відбитий від об'єкта промінь вловлюється плоским дзеркалом і прямує на параболічне дзеркало, з якого надходить одночасно на диссектор (або матрицю фотоприймача) – для визначення кутових координат і на фотоелектронний помножувач (або інший детектор) – для визначення дальності об'єкта. Електричні сигнали з диссектора подаються в систему, що стежить, керуючу становищем передавальною і приймальною оптичних систем локатора[12].

Великий обсяг та різноманіття літератури, присвяченій складної області оптичної локації включає питання прийому та обробки одержуваної

інформації. Однак, області застосування локаторів настільки широкі, що людство постійно вдосконалює, розширює можливості даних систем.

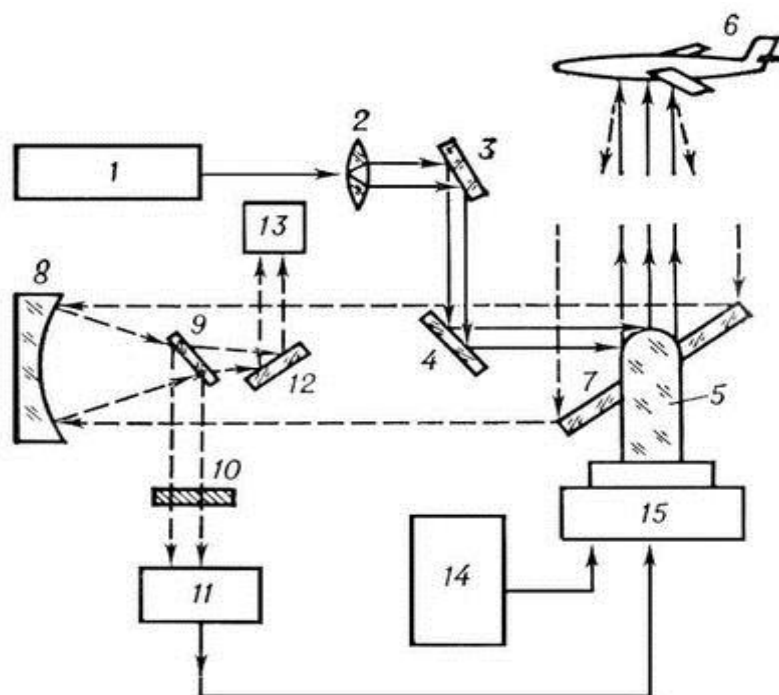


Рисунок 1.1 – Схема та принцип дії оптичного локатора

На рисунку 1.1 зображені такі складові локатора: 1 – передавач (лазер); 2 – коліматор; 3, 4 – дзеркала; 5 – передає оптична система; 6 – лоцируємий об'єкт; 7 – приймальна оптична система; 8 – дзеркало; 9 – напівпрозоре дзеркало; 10 – вузько-смуговий оптичний фільтр; 11 – диссектор; 12 – дзеркало; 13 – приймач далекомірного пристрою (фотоелектронний помножувач); 14 – пристрій ручного управління; 15 – спостерігаюча система. Пунктиром показаний хід променів, відбитих від об'єкта.

1.3. Принципи отримання локаційної інформації

Отримання локаційної інформації здійснюється в процесі прийому і обробки оптичних локаційних сигналів, які формуються в результаті вторинного або власного випромінювання об'єктів і є носіями інформації.

Залежно від характеру випромінювання об'єктів розрізняють активну, полуактивну і пасивну оптичну локацію.

1.3.1. Активна оптична локація

Заснована на використанні ефекту вторинного випромінювання (відображення, розсіювання) оптичних хвиль активна оптична локація може проводитися з використанням некогерентних і когерентних (лазерних) оптичних сигналів.

Активна локація з використанням некогерентного оптичного випромінювання. Широко використовувалася в період першої та другої світових війн.

Джерелами первинного випромінювання були прожектори. Відбиті сигнали видимого діапазону спостерігалися візуально. В окремих випадках прожектор сполучався зі звуколокатором або радіолокатором. Сучасні прожектори інфрачервоного (ІЧ) діапазону використовуються в системах нічного бачення з перетворенням ІЧ відбитого сигналу в видимий за допомогою оптико-електронного приймального пристрою[2].

Лазерна локація. Виділилася в самостійну галузь радіоелектроніки після створення на початку 60-х років джерел когерентного випромінювання – лазерів. Використання лазерного випромінювання в активній оптичній локації призвело до ряду властивих їй важливих особливостей.

Мала довжина хвилі електромагнітного випромінювання лазерів дозволяє отримувати вузькі діаграми спрямованості (від одиниць до десятків кутових секунд) навіть при невеликих розмірах випромінювачів (одиниці дециметрів). При розбіжності випромінювання, яка дорівнює одній кутовий секунд (1=5·10⁻⁶ рад), поперечний розмір опромінюється на дальності 200 км складає 1м, що дозволяє роздільно зондувати окремі елементи цілі.

Тимчасова і просторова когерентність випромінювання лазерів забезпечує стабільність частоти при високій спектральній щільності їх

потужності. Останнє, а також гостронаправленість лазерного випромінювання, обумовлює високу перешкодозахищеність лазерних локаційних засобів від впливу природних джерел випромінювання.

Висока частота коливань призводить до великих доплерівським зрушень частоти при взаємних переміщеннях мети і локатора. Це забезпечує високу точність вимірювання радіальної швидкості елементів мети, але вимагає розширення смуги приймальних пристроїв.

Поширення хвиль оптичного діапазону в газоподібних і рідких середовищах супроводжується їх значним розсіюванням. Це призводить до атмосферних перешкод зворотного розсіювання на вході приймального пристрою і є, крім того, демаскуючим фактором. На рис. 1.2 приведена структурна схема та особливості побудови лазерного локатора.

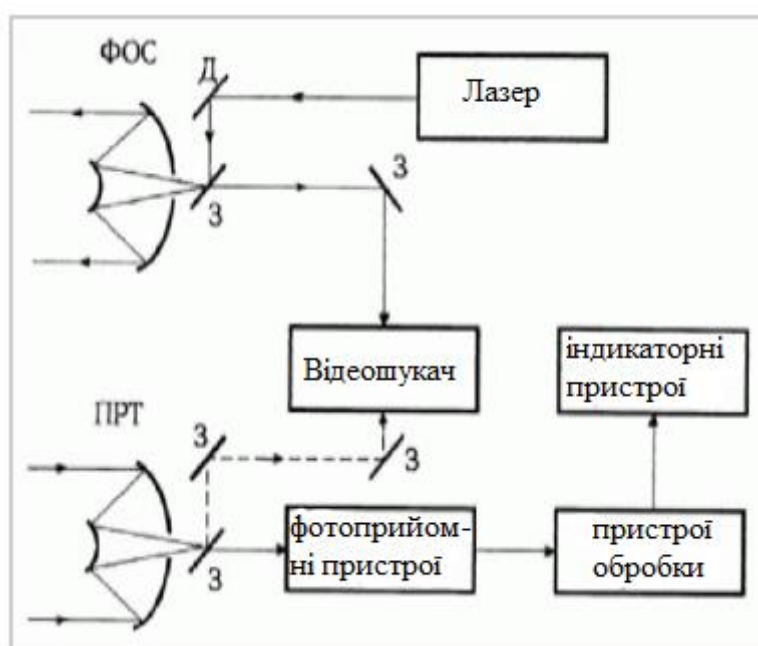


Рисунок 1.2 – Структурна схема та особливості побудови лазерного локатора

Основним елементом передавального пристрою є лазер. Спектральна лінія випромінювання робочого тіла лазера визначає несучу частоту локатора.

У сучасній локації використовуються лазери:

- на двоокису вуглецю CO_2 ;

- на іони неодиму;

- на рубін;

- на парах міді та ін.

Газові CO_2 -лазери мають високі середні вихідні потужності (до десятків кіловат), високою монохроматичністю (ширина спектра кілька кілогерц), високим коефіцієнтом корисної дії (до 20 %), працюють як в безперервному, так і в імпульсному режимі, компактні. Твердотільні неодимові і рубінові лазери використовуються в основному в імпульсному режимі (частота повторення 0,1 – 100 Гц); енергія їх випромінювання в імпульсі до одиниць джоулів; ккд одиниці відсотків. Лазери на парах міді забезпечують високу частоту повторення (до десятків кілогерц) при середній потужності до 100 Вт.

В фотоприйомних пристроях лазерного локатора на відміну від РЛС практично не використовують посилення сигналів на несучій частоті. При цьому ускладнюється конструкція і огляд простору. Використовується лише пряме посилення відеосигналів, а при гетеродинному прийомі - радіосигналів проміжної частоти.

1.3.2. Напівактивна оптична локація

Напівактивна оптична локація використовує явище вторинного випромінювання (відображення) цілями оптичних хвиль від джерела природного інтенсивного первинного випромінювання. Найчастіше таким джерелом є Сонце. Засоби напівактивної локації, засновані на цьому принципі, називають оптико-електронними станціями. До засобів напівактивної оптичної локації можна віднести також біологічні зорові системи. Нехтуючи фактором використання вторинного випромінювання, оптико-електронні станції часто відносять до засобів пасивної оптичної локації.

1.3.3. Пасивна оптична локація

Використовує власне оптичне випромінювання нагрітих ділянок поверхні цілі або іонізованих утворень в її околиці. Відомо, що максимум випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі T (за Кельвіном) припадає на довжину хвилі $\sim 2898T/\text{мкм}$. Довжина хвилі, на яку припадає максимум випромінювання реальних цілей, зазвичай знаходиться в інфрачервоній області спектра (лише при $T \sim 4000\text{K}$ максимум збігається з червоною, а при $T \sim 5000\text{K}$ – з жовтою областю видимого спектру). Засоби пасивної оптичної локації зазвичай працюють тому в ближньому ІЧ діапазоні. До подібних засобів відносять ІЧ пеленгатори, тепловізори, теплові головки самонаведення, пасивні прилади нічного бачення і ін. Вони грають важливу роль в системах попередження про ракетний напад і протиракетної оборони [6].

1.4. Загальні особливості оптичної локації

Визначаються використанням діапазоном частот. Висока спрямованість зондуючого випромінювання і вузькі поля зору прийомних каналів істотно обмежують можливості оптичних локаційних засобів з огляду простору. Тому пошук і виявлення цілі оптичними локаційними засобами здійснюються в більшості випадків з використанням зовнішнього цілевказування, для чого вони сполучаються з радіолокаційними системами. У процесі прийому слабких сигналів проявляється квантова природа електромагнітних хвиль. Квантові шуми сигналу обмежують чутливість ідеального оптичного приймача за відсутності перешкод на рівні енергії хоча б одного фотона $[hf = (2,65...4,97) \times 10^{-19}]$ Дж для видимого діапазону. В оптичному діапазоні полегшується отримання некоординатної інформації про цілі, її розміри, форму, орієнтації і т.д. При отриманні використовують поляризаційні й фотометричні характеристики розсіяного випромінювання, реєструють зображення мети. Отримання некоординатної інформації часто є

основним завданням оптичних локаційних засобів. Створення навмисних перешкод для оптичної локації можливо, але складніше, ніж для радіолокації.

1.5. Електрооптичний далекомір

Якщо оптичний локатор визначає лише відстань до об'єктів, він називається електрооптичним далекоміром.

Електрооптичний далекомір – прилад для вимірювання відстаней за часом проходження вимірюваної відстані електромагнітними хвилями оптичного або інфрачервоного діапазонів. Під час вимірювання відстані використовуються фазовий або імпульсний методи. У фазовому методі для визначення дальності вимірюється різниця фаз поданого на об'єкт і відбитого сигналу. Недоліком фазових далекомірів є обов'язкове вживання дзеркального відбивача, що встановлюється біля вимірюваного об'єкту. У зв'язку з цим більшого поширення набув імпульсний метод.

При випромінюванні з постійною швидкістю можливо визначати дальність до об'єкту з великою точністю застосовуючи імпульсний метод.

При імпульсному методі дальнометрії використовується наступне співвідношення:

$$L = \frac{c \cdot t}{2}, \quad (1.1)$$

де L – відстань до об'єкту;

c – швидкість поширення випромінювання;

t – час проходження імпульсу до мети і назад.

Як випливає з виразу 1.1, для зменшення похибки вимірювання дальності до об'єкта необхідно забезпечити сталість швидкості поширення випромінювання в шарі середовища і його прямолінійність. Ці умови не завжди здійсненні: наприклад, при розташуванні далекоміра на повітряному

судні і скануванні їм об'єктів на Землі необхідно враховувати явище рефракції, яке приводить до викривлення оптичного шляху лазерного випромінювання. При лазерній локації в турбулентних середовищах оптичний шлях лазерного випромінювання також спотворюється (відрізняється від прямолінійного).

1.6 Види далекомірів та їх принцип роботи

Існує декілька основних методів вимірювання дальності до нерухливих й рухливих цілей: імпульсний, фазовий, частотний, та інші. Розглянемо їх більш детально.

1.6.1 Імпульсний метод лазерної далекометрії

Імпульсний метод лазерної далекометрії (ІМЛД) зазвичай реалізують за допомогою твердотільних лазерів, які дозволяють формувати гігантські світлові імпульси, тобто імпульси лазерного випромінювання великої потужності (близько $10^9 - 10^{11}$ Вт) і малої тривалості (близько 10^{-8} с). Використання таких імпульсів випромінювання в імпульсних лазерних далекомірах (ІЛД) в якості зондувальних забезпечує велику дальність їх дії, а також високу точність і роздільну здатність. З цієї причини імпульсні лазерні далекоміри на твердотільних (рубінових, неодимових, ербієвих і ін.) лазерах набули найбільшого поширення. Поява і швидке вдосконалення твердотільних лазерів на ітрій-алюмінієвому гранаті (АІГ) з домішкою іонів неодиму дозволило реалізувати частотний режим імпульсної роботи лазерного передавача далекомірів з частотою проходження імпульсів 10 – 100 Гц. Напівпровідникові лазери також широко застосовуються для імпульсної дальнометрії, особливо в космічних бортових локаційних системах, так як вони забезпечують роботу ІЛД з великою частотою повторювання зондувальних імпульсів ($F \geq 1000$ Гц), володіють великим ККД і мають малі

розміри. Недоліком напівпровідникових лазерів в даний час є мала імпульсна потужність випромінювання що не перевищує 100 Вт[7].

Імпульсний метод базується на вимірюванні проміжку часу, необхідного для проходження імпульсу випромінювання до об'єкта й назад, по кількості каліброваних імпульсів.

На рис. 1.3 відображена типова схема імпульсного лазерного далекоміра.

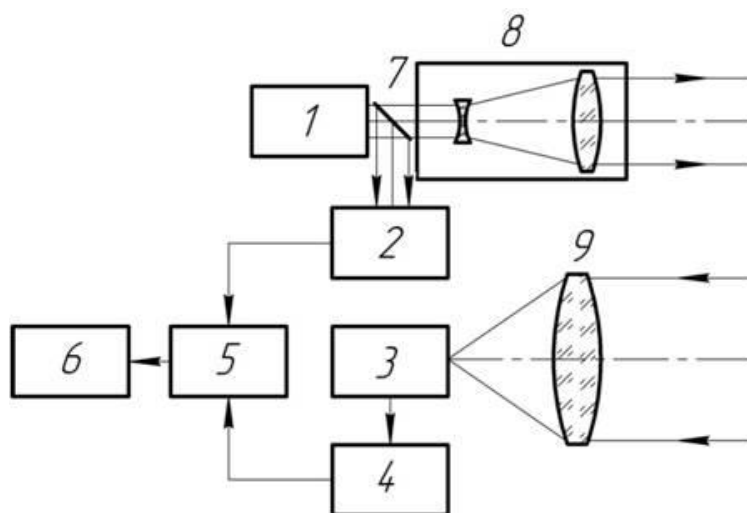


Рисунок 1.3 – Схема імпульсного лазерного далекоміра

Як видно з рисунка, класичний імпульсний лазерний далекомір складається з джерела випромінювання лазера 1, приймача випромінювання для створення стартового сигналу 2, приймача поверненого об'єктом випромінювання 3, блока управління 4, приладу відліку часу 5, лічильника імпульсів 6, світлової пластини 7, оптичної системи передавального каналу 8 та оптичної системи приймального каналу 9. Лазер випускає світловий імпульс, в цей же момент спрацьовує прилад відліку часу. Випромінювання проходить відстань до об'єкту, частково відбивається і повертається до далекоміра, після чого за допомогою оптики приймального каналу фокусується на фотоприймачі. Сигнал посилюється і подається на прилад відліку часу.

Імпульсна модуляція випромінювання здійснюється методом зміни добротності оптичного резонатора (швидкість обертання призми

20 000 об/хв). Тривалість імпульсів, що формуються $t_{\text{и}} = 0,05$ мкс, а імпульсна потужність близька до 2 МВт. Вага такого далекоміра 23 кг; максимальна дальність дії 10 км; помилка виміру дальності не більше 5 м при абсолютному значенні вимірюваної дальності 10 км (тобто відносна похибка виміру $\pm 0,05$ %).

1.6.2 Фазовий метод лазерної далекометрії (ФМЛД)

Фазовий метод виміру дальності заснований на реєстрації запізнення фази модульованого сигналу при подвійному проходженні вимірюваної відстані. Дальність до об'єкта в даному випадку є функцією різниці фаз і частоти модуляції випромінювання.

Фазовий метод використовують для точного виміру відстані до об'єкта від декількох метрів до декількох кілометрів.

Фазовий метод на модульованому випромінюванні використовується у всіх наземних геодезичних і топографічних світлодалекомірах і радіодалекомірах, межа дальності дії яких може лежати в діапазоні від декількох кілометрів до декількох десятків кілометрів [8].

Фазовий метод лазерної дальнометрії може бути реалізований без модуляції лазерного випромінювання передавача далекоміра, тобто на оптичній несучій. При роботі в сильно анізотропних або турбулентних середовищах, яким є приземний шар атмосфери, кращою виявляється реалізація ФМЛД на СВЧ піднесучій, тобто на частоті обвідної (амплітудна модуляція).

На рис. 1.4 показана функціональна схема фазового далекоміра .



Рисунок 1.4 – Функціональна схема фазового далекоміра

1.6.3 Частотний метод дальнометрії

Частотний метод лазерної дальнометрії (ЧМЛД) може бути реалізований при зміні фазової швидкості світлової хвилі за допомогою електричного (ефекти Покельса і Керра) або магнітного (ефект Фарадея) полів, а також пружних напружень (фотопружність), так як зміна фазової швидкості призводить до частотної (фазової) модуляції лазерного випромінювання. При певних умовах за допомогою зазначених оптичних ефектів можна отримати модуляцію поляризації та інтенсивності лазерного випромінювання. До теперішнього часу створені різні типи досить ефективних частотних модуляторів лазерного випромінювання в діапазонах НВЧ, засновані як на електрооптичних, так і на магнітооптичних ефектах. При цьому найбільшого поширення мають модулятори на кристалі дигідрофосфата калію KN_2PO_4 (KDP), що використовують лінійний електрооптичний ефект у видимій та інфрачервоній областях спектру. Зауважимо, що такі модулятори використовують і для імпульсної модуляції випромінювання твердотільних лазерів, наприклад, лазерів на YAG з іонами неодиму з довжиною хвилі випромінювання 1,06 мкм.

1.7 Принцип дії імпульсних далекомірів

Принцип дії лазерних імпульсних далекомірів заснований на вимірюванні інтервалу часу, між моментом випромінювання зондуючого лазерного моноімпульса (стартового імпульсу), що надходить з опорного фотодетектора і моментом прийому випромінювання, відбитого від об'єкта (опорного імпульсу), який приходить на вхід вимірювача часових інтервалів з порогового детектора. Джерелом випромінювання в таких приладах є імпульсний лазер (зазвичай твердотільний або напівпровідниковий), випромінювання якого колімується за допомогою оптичної передавальної системи. При формуванні лазерного імпульсу частина лазерного випромінювання відводиться (наприклад, за допомогою напівпрозорого дзеркала) на опорний фотодетектор. Відбите від об'єкта випромінювання потрапляє в приймальний канал, що складається з приймальної оптичної системи, приймача випромінювання – фотодетектора і підсилювача сигналу. Вимірювач часових інтервалів починає роботу в момент випромінювання (рис. 1.5). Лазерний імпульс по сигналу від опорного детектора і завершує її в момент прийому відбитого випромінювання по сигналу від порогового детектора, видаючи цифровий код отриманого результату на індикатор дальності.

При постійній швидкості поширення електромагнітного випромінювання в шарі середовища (атмосфері, космосі, воді) дальність до об'єкта можна розрахувати за допомогою наступного виразу (при цьому враховується, що лазерне випромінювання проходить подвійну відстань).

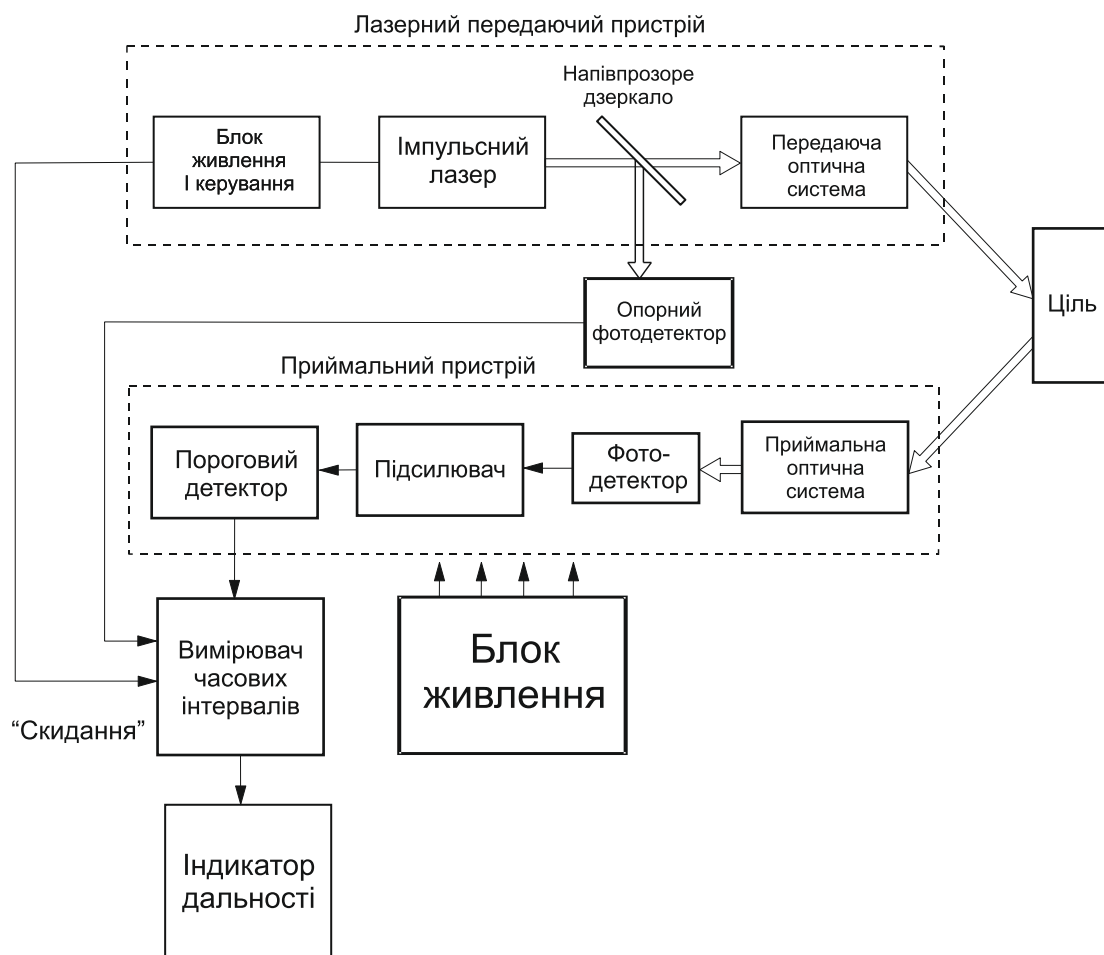


Рисунок 1.5 – Функціональна схема лазерного імпульсного далекоміра

При постійній швидкості поширення електромагнітного випромінювання в шарі середовища (атмосфері, космосі, воді) дальність до об'єкта можна розрахувати за допомогою наступного виразу (при цьому враховується, що лазерне випромінювання проходить подвійну відстань).

1.8 Підвищення точності імпульсних оптичних локаторів

Проблема забезпечення високих точностей вимірювання відстаней імпульсними оптичними далекомірами залишається актуальною, незважаючи на наявні досягнення в останні роки. Високі точності вдається забезпечити, шляхом усереднення при багаторазових вимірах [9].

При вимірюванні дальності імпульсним методом випадкова похибка вимірювання в основному визначається двома складовими: шумової та методичної. Перша обумовлена зсувом відлікової точки під дією шумів (похибка визначення часу затримки сигналу), друга – методом виміру тимчасового інтервалу. Потенційна точність при імпульсному вимірі дистанції матиме місце в умовах оптимальної фільтрації та фіксації тимчасового положення сигналу по його максимуму, що відповідає і оцінці часу затримки по максимуму правдоподібності. У цьому випадку середня квадратична похибка часу затримки сигналу буде визначатися відомим виразом:

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{\omega_1 \mu}, \quad (1.2)$$

де $\omega_1 = \left[\frac{\int_0^{\infty} \omega^2 |S \cdot j\omega|^2 d\omega}{\int_0^{\infty} |S \cdot j\omega|^2 d\omega} \right]^{\frac{1}{2}}$ – середня квадратична частота спектра сигналу;

μ – величина відношення сигналу до шуму на вході схеми фіксації часового положення;

$S \cdot j\omega$ – спектральна функція приймаючого сигналу.

При вимірюванні тимчасового інтервалу використовується або прямий метод заповнення його рахунковими імпульсами, або непрямі методи вимірювання. Найбільше розповсюдження серед них отримали ноніусний метод і метод пропорційного розтягування тимчасового інтервалу.

Сучасна елементарна база дозволяє прямим методом забезпечити максимальну величину похибки вимірювання часового інтервалу $\square 0,5 \div 1 \cdot 10^{-9}$ с. Непрямі методи можуть практично зменшити цю похибку вимірювання дальності при порівняно невеликих відносинах сигналу до шуму буде визначатися, головним чином, шумової складової, а при досить великих відносинах сигналу до шуму – методичної складової, тобто похибкою

вимірювання тимчасового інтервалу. Підвищення точності при усередненні багаторазових вимірювань слід очікувати лише для таких величин сигнал/шум, при яких шумова похибка за своєю величиною перекидає період проходження рахункових імпульсів, що заповнюють часовий інтервал. В цьому випадку N -кратне – вимір постійної за величиною дистанції дозволить скоротити похибку визначення дальності приблизно в N раз, при значній величині відношення сигналу до шуму, коли шумовою складовою похибки вимірювання можна знехтувати, закон великих чисел не працює через відсутність фактора випадковості і, отже, усереднення багаторазових вимірів не призводить до зменшення похибки визначення дальності. Саме робота в цих умовах при вимірі малих дистанцій, коли практично майже не позначається вплив умов поширення випромінювання, становить інтерес для створення високоточних імпульсних оптичних далекомірів.

Пропонуються два методи підвищення точності при багаторазових вимірах:

- метод штучного введення фактора випадковості;
- метод непрямої дискретизації періоду проходження рахункових імпульсів, що заповнюють часовий інтервал.

На рис. 1.6 приведена структурна схема імпульсного далекоміра з шумовий синхронізацією моменту випромінювання, що реалізує перший метод.

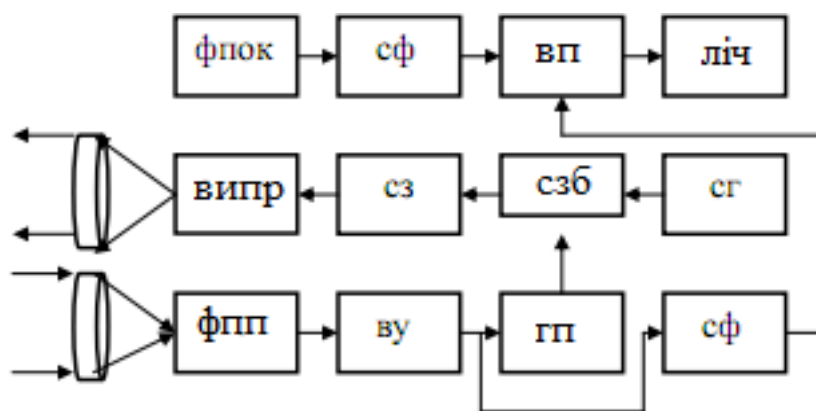


Рисунок 1.6 – Структурна схема оптичного далекоміра з шумовою синхронізацією випромінювання

На схемі зображені такі складові: ФПОК – фотоприймач опорного каналу, СФ – схема фіксації тимчасового положення сигналу, ВП – вимірювальний пристрій (схема вимірювання тимчасового інтервалу), ЛПЧ – електронний лічильник, ВИПР – випромінювач, СЗ – схема запуску випромінювача, СЗБ – схема збігів, СГ – синхрогенератор, ФПП – фотоприймальний пристрій, ВУ – відеопосилувач, ГП – граничний пристрій.

У цій схемі далекоміра запуск випромінювача здійснюється в межах тривалості імпульсу синхрогенератора шумовим викидом приймально-підсилювального тракту. Для цього в схему далекоміра введені додаткова схема збігів і граничний пристрій, рівень спрацьовування якого близький до величини середнього квадратичного значення шумів на виході приймально-підсилювального тракту. Таким чином, вимірюваний часовий інтервал (відповідний визначається дистанції) при кожному вимірі буде випадковим чином орієнтований по відношенню до рахункових імпульсів вимірювального пристрою. В результаті незалежно від значення величини відношення сигналу до шуму усереднення за N вимірювань знизить випадкову похибку визначення дальності приблизно в $\sqrt{N}$ раз.

Важливим завданням є підвищення точності імпульсних далекомірів при скороченні часу вимірювання. Істотно скоротити час вимірювання при усередненні інформації про дальності дозволяє використання методу непрямой дискретизації періоду проходження імпульсів заповнення тимчасового інтервалу, що є модифікацією методу багаторазового рециркуляції імпульсів з послідовним фазовим зрушенням [3,4]. Сутність цього методу полягає в тому, що при усередненні за N вимірювань кожен раз вимірюваний часовий інтервал зсувається по відношенню до рахункових імпульсів на $1/N$ періоду їх слідування. При цьому число рахункових імпульсів, що укладаються в часовий інтервал, при кожному вимірі може відрізнятися тільки на одиницю. Тоді при N вимірах K раз в часовий інтервал буде укладатися $m+1$ рахункових імпульсів, а $(N - K)$ раз – m рахункових імпульсів. Отже, при усередненні вимірюваний часовий інтервал буде визначатися залежністю:

$$\tau_{изм} = \frac{m(N-K) + (m+1)K}{N} T_c = mT_c + \frac{K}{N} T_c, \quad (1.3)$$

де T_c – період проходження рахункових імпульсів.

Таким чином, максимальна похибка вимірювання часового інтервалу буде, наприклад, при використанні метода прямого рахунку вже складати не $\pm T_c$, а $\pm \frac{T_c}{N}$. Слід зауважити, що в цьому випадку похибка вимірювання буде в $\sqrt{N}$ раз менше, ніж при звичайному усередненні.

Технічну реалізацію цього методу можна проілюструвати структурною схемою, наведеною на рис. 1.7, на якому поряд з наведеними вище позначеннями, використані наступні: КВОЛЗ – керована волоконно-оптична лінія затримки, ДРІ – дільник рахункових імпульсів. У ДРІ також формується сигнал для управління КВОЛЗ.

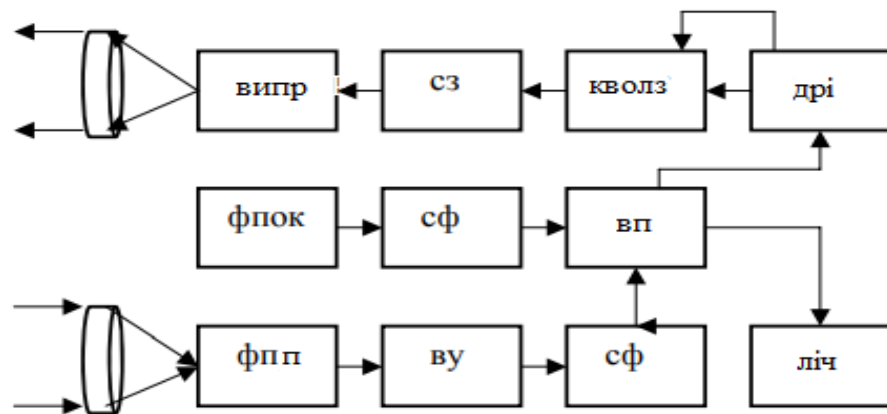


Рисунок 1.7 – Структурна схема імпульсного оптичного далекоміра з непрямою дискретизацією періоду рахункових імпульсів

Представлена схема імпульсного оптичного далекоміра відрізняється від звичайної тим, що синхроімпульсів для запуску випромінювача проходять через керовану волоконно-оптичну лінію затримки, а формуються вони

дільником шляхом ділення рахункових імпульсів, що знімаються з вимірювального пристрою. Природно, що основним пристроєм, що реалізує розглянутий метод, є керована волоконно-оптична лінія затримки, схема якої представлена на рис.1.8. Ця лінія затримки складається з світлодіодного випромінювача (СДВ), фотоприймача (ФП), схеми управління (СУ), N рідкокристалічних оптичних затворів (РКЗ), N оптичних волокон однакової довжини, що йдуть від СДВ до РКЗ, і N оптичних волокон, що йдуть від затворів до фотоприймача[10].

При цьому довжина кожного з волокон, що йдуть до фотоприймача, більше попереднього на величину, пропорційну за часом поширенню випромінювання в них на $1/N$ періоду проходження рахункових імпульсів. Таким чином, одне з волокон має мінімальну (обумовлену конструктивними міркуваннями) довжину, а кожне наступне волокно більше попереднього на

величину $\frac{T_c C}{N}$ (C – швидкість поширення випромінювання в волокні). Відзначимо, що відкритий тільки один з оптичних затворів, а схема управління послідовно відкриває рідкокристалічні оптичні затвори під час вступу на вхід керованої волоконно-оптичної лінії затримки синхроімпульсів з дільника. Таким чином, запуск випромінювача далекоміра здійснюється кожен раз з дедалі більшим часовим інтервалом по відношенню до рахункових імпульсів.

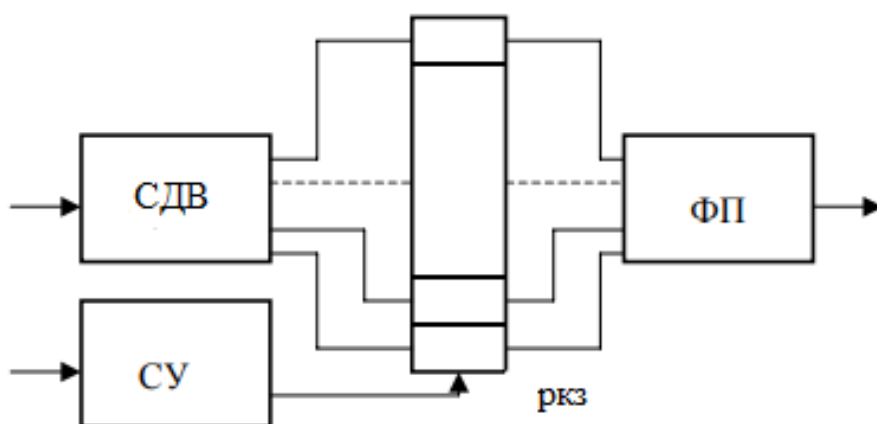


Рисунок 1.8 – Схема керованої волоконно-оптичної лінії затримки

Так як всі оптичні волокна йдуть від одного світлодіодного випромінювача до одного фотоприймача, то систематична помилка зводиться до нуля, а випадкова похибка вимірювання тимчасового інтервалу зменшується в N раз.

При частоті випромінювання 10 кГц з використанням пристрою пропорційного розтягування тимчасового інтервалу з коефіцієнтом $k = 10$ та частотою рахункових імпульсів 1 ГГц застосування даної схеми з усередненням за 10 вимірювань дозволить визначити дальність з похибкою ± 3 мм. При цьому час вимірювання складе 10^{-3} с. Чутливість імпульсного далекоміра може бути доведена і до величини, яка менша 1 мм.

Запропоновані схеми імпульсних далекомірів дозволяють не тільки надійно збільшити точність вимірювань, але і істотно скоротити при цьому час вимірювання.

Імпульсні оптичні далекоміри, побудовані на основі методу непрямої дискретизації періоду проходження рахункових імпульсів, призначені, головним чином, для вимірювання невеликих дистанцій і можуть знайти застосування в технологічних процесах, наприклад, для дефектоскопії розливних ковшів в сталеливарній промисловості.

1.9 Просторова фільтрація сигналу і розпізнавання сигналів

Основна ідея оптичної просторової фільтрації в полягає у використанні різних амплітудних, фазових або амплітудно-фазових оптичних фільтрів (світлофільтрів, фазових пластинок, діафрагм, голограм і ін.), Що розміщуються в області локалізації Фур'є-спектра переданого через оптичну систему зображення. В результаті двовимірний Фур'є-спектр переданих сигналів змінюється заданим чином, що і обумовлює необхідну зміну форми сигналів на виході такої оптичної системи.

На рис 1.9 зображено найпростіший просторовий фільтр для обробки зображень, який містить дві лінзи з суміщеними задньою (для першої лінзи) і

передню (для другої лінзи) фокальними площинами, і фільтр-транспарант, розташований в площині поєднання P_2 .

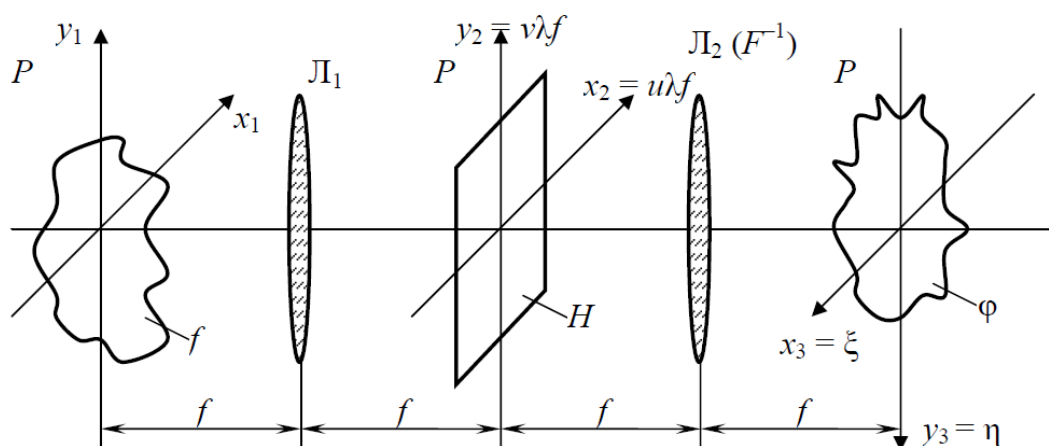


Рисунок 1.9 – Схема оптичної просторової фільтрації

У передній фокальній площині P_1 першої лінзи за допомогою транспаранта, що освітлюється просторово-когерентною хвилею, створюється вихідне розподіл світлового поля $f(x_1, y_1)$. Перша лінза L_1 здійснює перше (пряме) перетворення Фур'є вихідної функції, при цьому в її задній фокальній площині P_2 формується розподіл амплітуди випромінювання $F(u, v)$, відповідне просторового спектру підводиться сигналу,

$$F(u, v) = F[f(x_1, y_1)]. \quad (1.3)$$

У спектральній площині P_2 встановлений просторовий фільтр з комплексної амплітудної функцією пропускання $H(u, v)$. Дія такого фільтра зводиться до множення функції пропускання фільтра на розподіл спектра вводиться функція

$$F(u, v) \rightarrow H(u, v) \cdot F(u, v). \quad (1.4)$$

Друга лінза виконує друге (умовно зворотне) перетворення Фур'є, в результаті чого розподіл амплітуди світлового поля в її задній фокальній площині P_3 має вигляд

$$\varphi(\xi, \eta) = F^{-1}[H(u, v) \cdot F(u, v)]. \quad (1.5)$$

На підставі теореми згортки виконується умова:

$$\varphi(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) f(x - \xi, y - \eta) dx dy \quad (1.6)$$

Звідки видно, що розподіл комплексної амплітуди випромінювання в вихідній площині P_3 оптичної системи являє собою двовимірну згортку вихідної функції $f(x, y)$ і функції $h(x, y)$, що дорівнює зворотному перетворенню Фур'є від функції $H(u, v)$ пропускання просторового фільтра.

1.9.1 Просторовий фільтр (корелятор) Вандер Люгта

Якщо в якості частотного просторового фільтра в системі, показаній на рис. 1.9 використовується тонка амплітудна голограма, така система набуває властивості комплексного узгодженого фільтра і може використовуватися для розпізнавання оптичних зображень.

Виготовлення просторового фільтра Вандер Люгта проводиться за схемою запису пропуску голограми еталонного зображення, показаної на рис. 1.10. Тут в площині P_2 формується розподіл амплітуди $H(u, v)$ світлової хвилі, пропорційне перетворення Фур'є від розподілу $h(x_1, y_1)$ еталонного зображення:

$$H(u, v) = F[h(x_1, y_1)]. \quad (1.7)$$

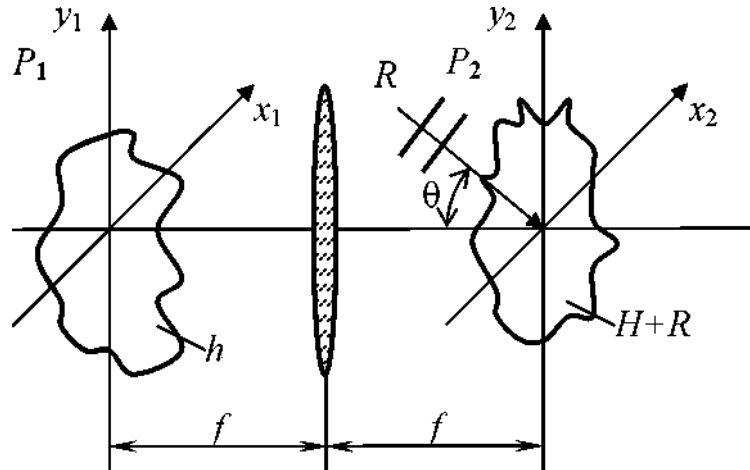


Рисунок 1.10 – Голографічний запис фільтра Вандер Люгта

Ця хвиля інтерферує з плоскою опорною хвилею R , падаючої під кутом θ до оптичної осі. У площині P_2 амплітуда поля опорної хвилі дорівнює

$$R(x_2, y_2) = re^{-j2\pi\alpha y_2}, \quad (1.8)$$

де $\alpha = \frac{\sin \theta}{\lambda}$,

Просторовий фільтр (коррелятор) Вандер Люгта використовується в оптичних системах розпізнавання і обробки зображень, наприклад, для ідентифікації відбитків пальців в дактилоскопії, виявленні артефактів (будови, літаки, кораблі і т.п.) На аерофотознімки і ін. Конструкція фільтра зазвичай включає кілька паралельно діючих каналів, при цьому окремим еталонним сигналам відповідають певні ознаки таких зображень - кути, кола, прямі лінії і т. п. Відгук коррелятора ВДЛ інваріантний до паралельного зміщення и вводиться в площині P_1 сигналу, що можна витлумачити як наслідок сдвиговой інваріантності перетворення Фур'є. При цьому має місце взаємно-однозначна відповідність координати відгуку в вихідній площині ФВЛ і координати центру, що вводиться. Недоліками коррелятора ВДЛ є висока чутливість відгуку до зміни масштабу і поворотам, що вводиться. Ця

чутливість зростає при збільшенні частоти просторового спектра, тобто тонкої структури, що вводиться. Крім цього, досить високі вимоги пред'являються до якості оптико - механічної конструкції всієї системи просторової фільтрації, наприклад, точність установки просторового фільтра складає долі мікрометра [11].

2 ПОХИБКА ВИЗНАЧЕННЯ ДИСТАНЦІЇ ІМПУЛЬСНИМ ДАЛЕКОМІРОМ

2.1 Фактори, що впливають на похибку вимірювання

Згідно формули (2.9) дистанція визначається як:

$$L = \frac{c\Delta t}{2n}. \quad (2.9)$$

З цієї формули видно, що на точність визначення дистанції (похибки її вимірювання) впливають похибка визначення часу та похибка вимірювання показника заломлення атмосфери.

2.1.1 Області локалізації похибок

Для виявлення метрологічних обмежень імпульсного лазерного далекоміра обговоримо основні джерела і функціональні зони локалізації найбільш значущих компонентів похибки. Розглянемо їх в послідовності, поетапно характеризуючий процес вимірювання дальності. (рис. 2.1).

Перша область локалізації похибок включає в себе джерело формування локаційних сигналів і інші пристрої передавального тракту далекоміра. При цьому механізм формування помилок вимірювань включає в себе наступні основні фактори: нестабільність тимчасового положення імпульсів генерації, нестабільність їх амплітуди і форми.

Не обговорюючи фізичну природу цих факторів, відзначимо, що при відсутності необхідності прив'язки результатів вимірів до шкали часу перший з цих факторів до уваги може не братися. У разі ж необхідності такої прив'язки може бути встановлений додатковий вимірювач часових інтервалів між стартовим сигналом далекоміра і наступним за ним імпульсом системи єдиного часу (СЄЧ). Подібна ситуація характерна, наприклад, при

використанні лазера з пасивним затвором. У разі лазера з активною модуляцією добротності резонатора імпульс генерації можуть бути синхронізовані з сигналами системи єдиничного часу безпосередньо.

Реєстрація стартових і степових імпульсів випромінювання за допомогою єдиного фотоприйомний принцип переносе вирішення проблеми нестабільності їх амплітуди і форми в область приймального тракту імпульсного лазерного далекоміра, покладаючи її на влаштування тимчасової прив'язки. Технічно таке завдання вирішується шляхом відгалуження незначної частини лазерного випромінювання від джерела до ФПП. Необхідно підкреслити також, що подібна схема побудови ІЛД одночасно ліквідує додаткову, спотворюючу результати вимірювання дальності затримку стартового сигналу в електронних ланцюгах далекоміра, яка формується в разі його реєстрації окремим ФПП.

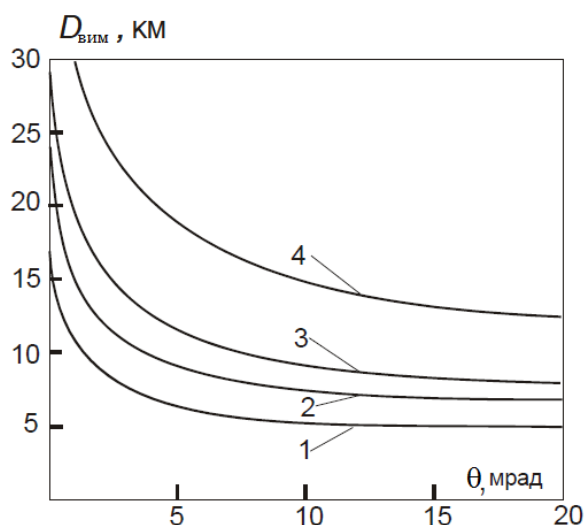


Рисунок 2.1 – Залежність дальності $D_{\text{вим}}$ до дифузно віддзеркалюючого об'єкту від розходження випромінювання передавача θ , при $W_{\text{пер}} = 0,2$ Дж;

$$P_{\text{пр}} = 10^{-8} \text{ Вт}; d_{\text{пр}} = 150 \text{ мм.}$$

Друга область локалізації компонент похибок пов'язана з поширенням лазерно випромінювання через атмосферу і включає в себе два головні

чинники: флуктуації амплітуди прийнятих сигналів, що викликається турбулентністю атмосфери, і збільшення часу поширення світлових імпульсів, обумовлене регулярною рефракцією атмосфери (рис. 2.2). Зниження впливу на результати вимірювань дальності першого з названих факторів може бути також забезпечено за допомогою пристрою часової прив'язки.

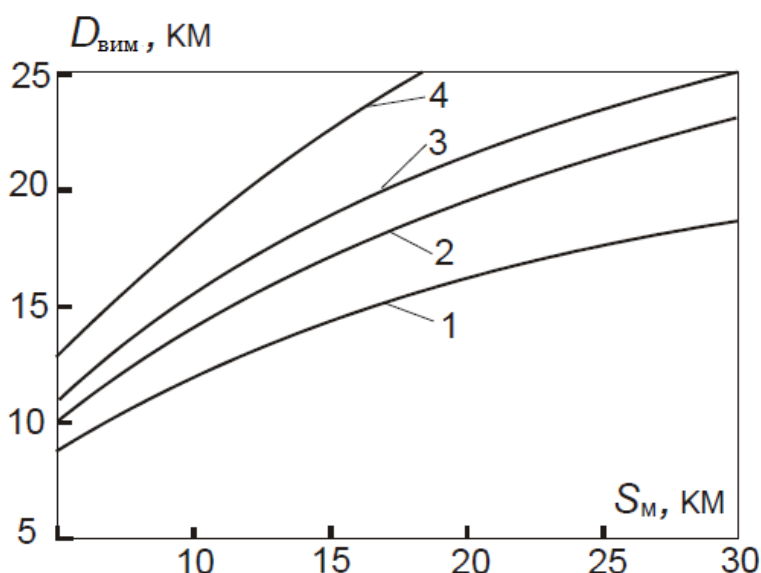


Рисунок 2. 2 – Залежність дальності $D_{вим}$ до дифузно відзеркалюючого об'єкту від метеорологічної дальності видимості S_m , при $P_{пр} = 5 \cdot 10^{-9}$ Вт;

$$\theta_{пер} = 1 \text{ мрад}$$

Третю областю локалізації помилок вимірювання є досліджуваний об'єкт. Слід розрізняти дві граничні ситуації: роботу далекоміра по дифузно відбиваючому або по кооперуючому об'єкту. Так, при вимірюванні дальності до об'єкта з дифузно відбиваючій поверхні величина похибки може досягати розмірів цього об'єкта в напрямку поширення лазерного випромінювання. Практичним висновком в подібній ситуації є недоцільність нарощування характеристик точності ІЛД вище названої межі, що в ряді випадків істотно заощаджує апаратурні і фінансові витрати. При знаходженні кооперованого об'єкта подібна проблема практично не існує: помилка, обумовлена розмірами

об'єкта, занадто мала і при оцінках похибки вимірювання дальності може не братися до уваги.

Серед факторів, що викликають помилки, локалізовані в області об'єкта, слід назвати також похибку наведення. І хоча безпосередньо від ІЛД вона не залежить, потрапляння на об'єкт різних зон світлового пучка може вносити додаткову похибку, пов'язану з неоднорідним розподілом енергії по перетину останнього. Відпрацювання даного фактора за допомогою УВП дозволяє, як і в попередніх ситуаціях, помітно знизити його вплив на сумарну похибку вимірювання дальності (рис. 2.3).

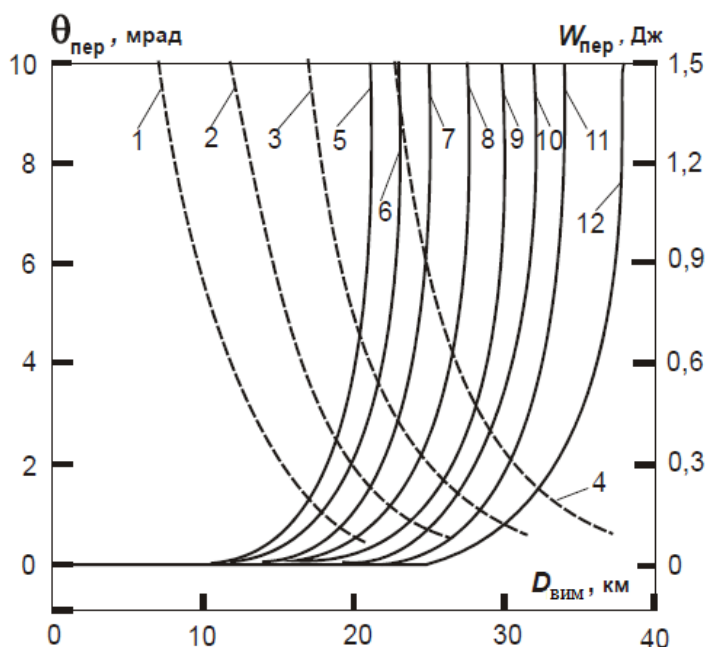


Рисунок 2.3 – Залежність дальності дії $D_{вим}$ від розбіжності $\theta_{пер}$ (1 – 4) і енергії $W_{пер}$ (5 – 12) випромінювання передавача при роботі по об'єкту, забезпеченому кутовим відбивачем

Нарешті, четверта область локалізації компонент похибки пов'язана з прийомним трактом далекоміра. Вона формується в процесі функціонування ряду пристроїв, головними з яких є ФПП і УВП, а також генератор опорної частоти (ГОЧ) і блок рахунку дальності (БРД).

Основним завданням фотоприймального пристрою, крім забезпечення необхідного рівня чутливості, є реалізація неспотвореної форми локаційних імпульсів. Її рішення пов'язане з швидкістю і динамічним діапазоном ФПП. При цьому перед-покладається, що низько швидкісні зміни рівня прийнятих світлових сигналів (обумовлені, наприклад, наближенням або видаленням лоцируємого об'єкта) можуть відпрацьовуватися оптичними атенюаторами, що входять до складу передавального і приймального трактів далекоміра[11]

Серед розмаїття сучасних ФПП є фактично лише три типу, задовольняючі вимоги ІЛД. До них відносяться фотоелектронні помножувачі, лавинні фотодіоди і рпн-фотодіоди (рпн-ФД). Для отримання неспотвореного квантовими ефектами наносекундного фотовідгуку імпульс повинен містити не менше 10^3 фотоелектронів, що при квантовому виході фотоemisії $\approx 0,1$ вимагає до 10^4 фотонів [5, 6]. Маючи на увазі, що реальне значення α може бути помітно вище, але для отримання достовірного одиничного вимірювання дальності необхідно відношення сигнал / шум, що значно перевищує одиницю (на практиці воно, як правило, не менше 3), відповідна гранична потужність прийнятого світлового сигналу повинна складати порядку 10^{-7} Вт. Реалізація такої чутливості при швидкодії $10^{-8} - 10^{-9}$ с і максимально широкому динамічному діапазоні сигналів представляє досить складне технічне і технологічне завдання.

Найбільш істотна функціональна навантаження, пов'язана з мінімізацією похибки вимірювання дальності, лягає, як це впливає з викладених матеріалів, на влаштування тимчасової прив'язки ІЛД. При використанні найбільш простого однопорогового УВП помилка вимірювання тимчасового інтервалу може досягати половини тривалості імпульсу локаційного сигналу, що в ряді випадків еквівалентно дальності в кілька метрів. Залежність чутливості ФПП $P_{пр}$ і енергії випромінювання передавача $W_{пер}$ в залежності від діаметра вхідної лінзи приймача наведена на рис. 2.4.

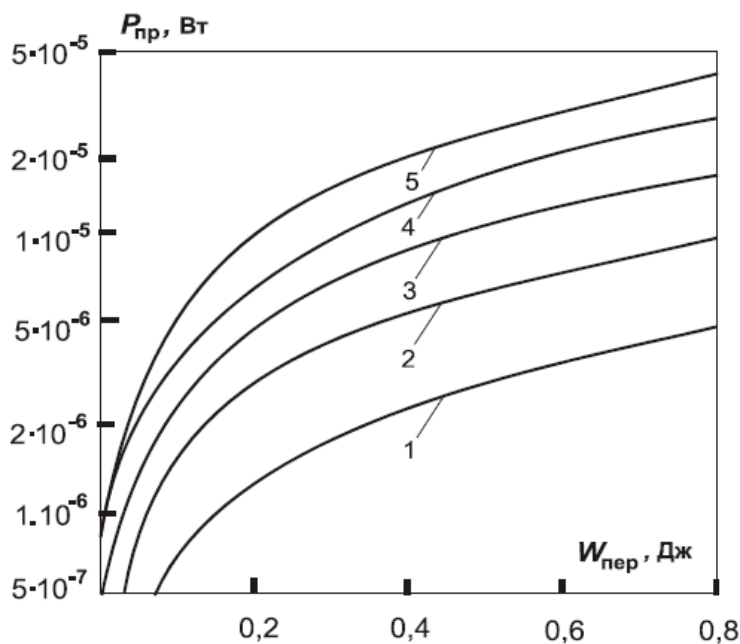


Рисунок 2.4 – Зв'язок чутливості ФПП $P_{\text{пр}}$ і енергії випромінювання передавача $W_{\text{пер}}$ в залежності від діаметра входної лінзи приймача

2.1.2 Оцінювання складових похибки вимірювання дистанції

Формулу (2.9) можна представити у вигляді:

$$L = c\tau / 2\tilde{n} + \delta L, \quad (2.10)$$

де c – швидкість світла;

τ – час проходження імпульсу до ВЧІ і назад;

$\tilde{n}$ – усереднений показник заломлення атмосфери уздовж траєкторії лазерного променя;

δL – поправка різниці довжини траєкторії лазерного променя в реальній атмосфері і геометричної довжини траєкторії (по прямій лінії).

Звідси видно, що найбільш важливими факторами точності вимірювань є: точність вимірювання часу τ поширення сигналу, точність визначення n і поправки δL . В табл. 2.1 наведені розрахункові дані компонент похибки вимірювання дистанції

Таблиця 2.1 – Розрахункові дані компонент похибки вимірювання дистанції

Вид операцій	Похибка, м
1. Калібрування	0,017
2. Похибка вимірювання, τ	0,033
3. Нестабільність системи	0,04
4. Часова прив'язка	0,035
5. Атмосферна поправка	0,03
6. Поправка по відбивачу	0,029
7. Сумарна середньоквадратична помилки	0,077

За результатами вимірювань з таблиці видно, що найбільший внесок в загальній похибці вимірювання дистанції мають: нестабільність системи; точність часової прив'язки; похибка вимірювання часу; атмосферна поправка

2.2. Розрахунок похибки в залежності від тривалості імпульсу

Як зазначалося вище, фазова швидкість світла V в речовині в n разів менше швидкості світла C у вакуумі. Безсумнівний інтерес представляє з'ясування причин такого зменшення швидкості світла з точки зору будови речовини. Так як розміри ядер атомів істотно менше відстаней між окремими атомами, то будь-яке середовище можна розглядати як вакуум з рідкісними вкрапленнями речовини (ядра атомів). Коли в середовищі поширюється світлова хвиля, то під дією електричного поля хвилі (впливом магнітного поля можна знехтувати) виникають коливання електронів і атомних ядер, наприклад в атмосфері, складові якої наведені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Показник заломлення речовин

Речовини	n	$\sqrt{\varepsilon}$
Азот	1,000299	1,000307
Водень	1,000139	1,000139
Вода	1,33	9

У класичній електронній теорії дисперсії прийнято вважати, що вплив поля істотно позначається тільки на характері руху зовнішніх (або оптичних) електронів. Оптичний електрон розглядається як затухаючий осцилятор з характерною власною частотою коливань ω_0 і коефіцієнтом загасання γ . Рівняння руху електрона під дією зовнішнього електричного поля хвилі має вигляд:

$$\ddot{\bar{r}} + 2\gamma\dot{\bar{r}} + \omega_0^2\bar{r} = -\frac{e}{m} \cdot \bar{E}_0 \cdot e^{-i\omega t}, \quad (2.11)$$

де, $\bar{r}$ – зміщення електрона з положення рівноваги.

Дане рівняння є рівнянням вимушених коливань, його рішення є суперпозицію власних згасаючих коливань на частоті, близькій до ω_0 , і вимушених незатухаючих коливань на частоті збудження ω . Амплітуда і фаза вимушених коливань після загасання власних коливань залежать від співвідношення власної частоти (ω_0) і частоти змушує поля (ω).

При виконанні умови $\omega \approx \omega_0$ в речовині виникає поглинання, в результаті енергія падаючої хвилі перетворюється в теплову енергію руху атомів. Відзначимо, що зазвичай існують не одна, а цілий набір власних частот, тому кожна речовина може мати смуги поглинання [16]. Якщо ж частота ω не влучає у смуги поглинання речовини, то атоми, що коливаються на частоті ω , стають джерелами вторинних хвиль, когерентних первинної (падаючої) хвилі. Таким чином, в середовищі поширюються (і інтерферують)

дві хвилі – первинна (падаюча) і вторинна (створювана хитаються електронами). Для знаходження параметрів вторинної хвилі можна скористатися теорією дифракції (метод кільцевих зон Френеля). З цієї теорії відомо, що сумарне випромінювання вторинних джерел, розташованих в площині, перпендикулярній до напрямку поширення первинної хвилі, становить половину (по амплітуді) випромінювання від першої зони Френеля.

При цьому напруженість поля вторинної хвилі зміщена по фазі на $\frac{2}{\pi}$ від поля первинної хвилі. Амплітуда вторинної хвилі буде пропорційна числу вторинних джерел (тобто концентрації атомів) і амплітудою коливань цих джерел (тобто дипольному моменту окремого атома) [14]. В результаті можна показати, що при проходженні шару речовини товщиною L з показником заломлення n , виникає додаткова (в порівнянні з поширенням хвилі в вакуумі) різниця фаз Φ , що задається формулою:

$$\Phi = (n - 1) \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L. \quad (2.12)$$

Таку ж формулу можна отримати, якщо вважати, що фазова швидкість поширення світла в середовищі в n разів менше швидкості світла у вакуумі. Таким чином, зменшення фазової швидкості світла в середовищі можна пояснити інтерференцією випромінювання від вторинних джерел (тих, хто вагається оптичних електронів) і первинної хвилі. Відзначимо, що якщо на речовину падає світловий імпульс, то його фронт повинен поширюватися через речовину зі швидкістю світла у вакуумі c , так як існує певний час встановлення вимушених коливань. І тільки після загасання власних коливань оптичних електронів фазова швидкість світла зменшиться до значення

$$u = \frac{c}{n}. \quad (2.13)$$

Тобто, знаючи фазову швидкість можна привести вираз для фазового показника заломлення середовища:

$$n_f = \frac{c}{u_f}. \quad (2.14)$$

Таким же чином, знаючи групову швидкість розраховується груповий показник заломлення середовища:

$$n_g = \frac{c}{u_g}. \quad (2.15)$$

В далекометрії в умовах атмосфери використовується груповий показник заломлення. Груповий показник заломлення залежить від частоти або довжини хвилі, температури, вологості та тиску, а також від турбулентності та флуктуацій атмосфери.

2.3 Вплив стану атмосфери на похибку визначення дистанції

Атмосфера складається з трьох основних компонентів: сухого повітря, водяної пари і аерозолів.

Сухе повітря є механічною сумішшю різних газів. Метеорологічні параметри його (тиск, щільність, температура) залежать від географічної широти, пори року, висоти та інших факторів.

Водяна пара – найбільш мінлива компонента атмосфери. В реальних умовах пар може з газової фази переходити в рідкий і твердий стан, утворюючи деякі види аерозолів.

До аерозолів відносяться тумани, димки, хмари, опади, а також пил і дим. Тумани і димки складаються з зважених в повітрі гідрометеорів: крапель води і кристаликів льоду, утворених в результаті конденсації водяної пари в приземленому шарі атмосфери, розміри частинок туманів можуть змінюватися

від часток мікрметра до десятків мікрметрів. Число частинок в 1 см^3 змінюється від 0,5 до 800 і більше.

Залежно від розміру частинок розрізняють мряку – краплі води радіусом менше 0,2 мм, дощ – краплі води радіусом 0,25 – 3,5 мм і сніг – кристалики льоду розміром до 8 – 9 мм. Розміри пластівців снігу, мокрого снігу і граду можуть досягати 25 мм.

Залежно від метеорологічної дальності видимості (МДВ) тумани поділяють на сильні (МДВ нижче 0,05 км), помірні (МДВ від 0,05 км до 0,5 км) і слабкі (МДВ від 0,5 км до 1 км). Димки вважаються сильними при МДВ від 1 км до 2 км, помірні при МДВ від 2 км до 4 км і слабкими при МДВ від 4 км до 10 км.

Траєкторія лазерного променя викривляється і відрізняється від геометрично прямий через неоднорідність показника заломлення в різних шарах атмосфери. Сумарна затримка проходження імпульсу по такій трасі залежить від температури, тиску, вологості повітря уздовж траси променя. Оцінка цього виду похибки являє собою непросту задачу і вимагає спеціальної технології визначення зазначених параметрів атмосфери на траєкторії імпульсу локації.

В даний час в сучасній фізиці, а також в лазерній далекометрії загально прийнято вважати, що в диспергуючих середовищах ,до яких відноситься земна тропосфера, модульовані, наприклад, по амплітуді світлові хвилі поширюються з груповими швидкостями, а їх несущі хвилі – з фазовими швидкостями. Під модуляцією електромагнітної хвилі розуміється будь-яка зміна, будь-якого параметра хвиль часі. Модулюють можуть бути випадкові і (або) детерміновані сигнали. Модульований параметрами хвиль можуть бути: амплітуда, частота, фаза або площину поляризації. Це дозволяє вважати, що будь-яке реальне випромінювання ЕМВ завжди модулювати. В існуючих лазерних інтерферометрах при виконанні вимірювань для введення поправок за показник заломлення диспергуючого середовища використовується фазовий

показник заломлення повітря n_p , а в модуляційних фазових світлодалекоміри скористується груповий показник заломлення n_{gp} .

Існує експериментальна формула розрахунку показника заломлення (2.16), яка дає точні результати тільки в вікнах прозорості атмосфери:

$$(n_{gp} - 1) = (2371.34 + 683939.7 \frac{130 + 1/\lambda^2}{(130 - 1/\lambda^2)^2} + 4547.3 \frac{38.9 + 1/\lambda^2}{(38.9 - 1/\lambda^2)^2})D_r + \\ + (6487.31 + \frac{174.174}{\lambda^2} - \frac{3.55750}{\lambda^4} + \frac{0.61987}{\lambda^6})D_B, \quad (2.16)$$

де D_r – множник визначальний внесок від сухого повітря;

D_B – множник визначальний внесок від водяного пара.

Груповий показник заломлення можна виміряти трьома способами.

1. Визначити температуру, тиск та вологість в двох точках: у точці де знаходиться далекомір та у точці об'єкту.
2. Проводиться вимірювання тих же параметрів тільки у точці де стоїть далекомір, але використовують двох частотний далекомір.
3. Вплив точності визначення показника заломлення на вимірювання відстані

2.4 Шляхи підвищення точності визначення дистанції. Двочастотний далекомір

Більшість існуючих оптоелектронних далекомірів використовують два принципи вимірювання дальності – імпульсний і фазовий. При однаковій середній потужності і інших рівних умовах імпульсні далекоміри мають велику дальність дії в порівнянні з фазовими. мають джерела безперервного випромінювання, але щодо точності імпульсні системи поступаються фазовим. У зв'язку з цим вельми перспективною виглядає система, в якій імпульсний характер випромінювання поєднувався б з фазовим методом індикації

принципом обробки сигналів, що дозволяє об'єднати переваги двох методів далекометрії. Груповий показник заломлення можна виміряти двома способами.

1. Визначити температуру, тиск та вологість в двох точках: у точці де знаходиться далекомір та у точці об'єкту.
2. Проводиться вимірювання тих же параметрів тільки у точці де стоїть далекомір, але використовують двох частотний далекомір.

На виході генераторів формуються два сигнали у вигляді меандрів з частотою f_{1M} і f_{2M} . Ці сигнали логічно перемножуються і подаються на драйвер лазера, який, в свою чергу, модулює струм накачування напівпровідникового лазера. Крім того, ці ж сигнали надходять через вузькосмугові фільтри на два фазових детектора в якості опорних напруг.

Після відбиття від зондуючого об'єкта модульоване одночасно двома частотами лазерне випромінювання зі зміненою фазою реєструється ФПП. Напряга з виходу ФПП посилюється широкосмуговим підсилювачем і подається на вузькосмугові активні фільтри, налаштовані на частоти f_{1M} і f_{2M} . Таким чином, з прийнятого сигналу складної форми виділяються дві гармоніки, які надходять на робочі входи відповідних фазових детекторів[13].

На виходах фазових детекторів формуються напруги, пропорційні зміщення фаз φ_1 і φ_2 , які згодом оцифровуються за допомогою АЦП. Результатом оцифровки сигналів є два довічних числа з розрядних b_1 і b_2 .

Перше число є грубо певної дальністю, а друге число – уточненням дальності до значення необхідної похибки. Для отримання підсумкового результату числа b_1 і b_2 «зшиваються» в одне число з розрядністю $b = b_1 + b_2$, яке і буде відповідати дальності до об'єкта (з необхідною точністю).

Розрядність b_1 повинна задовольняти умові грубого значення дальності без неоднозначності:

$$2^{b_1} \geq \frac{l_{max}}{\Delta l_1}. \quad (2.17)$$

У свою чергу, розрядність b_2 повинна задовольняти умові уточнення дальності до величини необхідної похибки:

$$2^{b_2} \geq \frac{\Delta l_1}{\Delta l_2} = \frac{c}{4f_{2M}\Delta l_2}. \quad (2.18)$$

Розглянемо напругу, що подається на драйвер лазера і відповідно перетворюване лазером в оптичне випромінювання. На виходах генераторів формуються меандри з частотами f_{1M} і f_{2M} . Ці сигнали надходять в перемножувач, позначений на функціональній схемі знаком «X» (див. рис. 1.9).

Після перемноження результуюча напруга можна описати наступною функцією:

$$U(t) = \text{comb}\left(\frac{t}{T_2}\right) \text{comb}\left(\frac{t}{T_1}\right). \quad (2.19)$$

При цьому кількість імпульсів в пачці можна визначити за формулою:

$$n = \frac{T_1}{2T_2} = \frac{f_2}{2f_1}. \quad (2.20)$$

Це значення є істотним для фазового детектора, яким необхідна певна кількість імпульсів для визначення різниці фаз сигналів. Для більшості існуючих фазових детекторів число n не повинно бути менше 50.

Останнім часом в результаті розвитку сучасних цифрових технологій з'явилися ефективні методи, що дозволяють підвищити точність вимірювання при одночасному зниженні необхідних частот модуляції і спрощення загальної електричної схеми далекоміра. Основним джерелом похибки вимірювання дальності є електронний вимірювач фази – фазометр.

Завдання вимірювання різниці фаз за допомогою цифрової обробки може бути вирішена різнманітними методами: методом компенсації фази, методом перетворення інтервалу часу в напругу, цифровим методом підрахунку кількості імпульсів, методом вимірювання фази з перетворенням частоти, квадратурних методом вимірювання фазового зсуву, синхронним

детектуванням, методом перетворення Фур'є з подальшим витяганням фазової складової, використанням зв'язку між амплітудо-частотними і фазочастотними характеристиками за допомогою перетворення Гілберта для мінімально-фазових ланцюгів. Однак всі перераховані методи мають наступні недоліки:

- точність методів сильно знижується при вимірюванні різниці фаз зашумлених сигналів, що особливо актуально для схем лазерних фазових далекомірів, що використовують перетворення Фур'є; так що в деяких випадках практично неможливо відновити фазу перешкоди сигналу;

- всі методи, крім методу перетворення Фур'є, не оптимальні при цифровій реалізації.

ВИСНОВКИ

Оптичні локатори сьогодні дуже користуються попитом в наш час. Вони потрібні для пошуку та ідентифікації малих безпілотних літальних об'єктів. Існує проблема захисту від несанкціонованих польотів безпілотних літальних апаратів приватних територій та об'єктів, аеропортів. Фахівці провідних компаній світу ведуть подібну розробку цих систем. Тому розвиток методів та систем оптичної локації є актуальним науковим та прикладним заданням.

При виконанні роботи були розглянуті такі питання, як принцип дії та конструкції оптичних локаційних систем. Виконано дослідження факторів, що обмежують можливості таких систем, виконаний аналіз систем ідентифікації зображень.

Оптичні локатори – це стик різних наук. Отримуючи деякі результати в цій науці, також виходять на новий рівень такі напрями фізики, як фізика оптики, квантова фізика, фізика компонентних матеріалів тощо.

Недоліки оптичних локаторів: низький ККД передавачів, висока чутливість приймачів, залежність роботи від метеорологічних умов, вузькі вікна прозорості атмосфери в діапазонах світлових і інфрачервоних хвиль і специфічні перешкоди від розсіювання випромінювання в зворотному до локатор напрямку. Ці перешкоди усуваються стробуванням приймача по дальності. Інші недоліки поки не усунуто, тому оптичні локаційні пристрої застосовуються тільки тоді, коли радіолокаційні системи не в змозі забезпечити необхідні точність і роздільну здатність. Оптична локація вимагає попередніх даних про місцезнаходження цілі, щоб здійснити без пошукове стеження (пошук дуже вузьким променем світла пов'язаний з великими труднощами)

В роботі було запропоновано доповнити оптичну локаційну систему блоком розпізнавання та супроводження цілі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1) Лебедько Е.Г., Порфирьев Л.Ф., Хайтун Ф.И. Теория и расчет импульсных и цифровых оптико-электронных систем. Ленинград: Машиностроение, 1984. 190 с.
- 2) Мирский Г.Я. Измерение временных интервалов, Москва: Госэнергоиздат, 1964. 84 с.
- 3) Лебедько Е.Г., Аверьянов Г.А., Хайтун Ф.И. Измерение временного интервала методом многократной рециркуляции с последовательным фазовым сдвигом. // Измерительная техника. 1971, № 10
- 4) Лебедько Е.Г., Аверьянов Г.А., Хайтун Ф.И. способ дискретного измерения временных интервалов, А.С. № 340340 от 28.02.1972.
- 5) Стрелков А.И., Стрелкова Т.А. Лытюга А.П. Оптическая локация. 2010. 252 с.
- 6) Зубаревич С.Э., Лебедько Е.Г., Соев Н.А., Метод стабилизации уровня принимаемого сигнала в оптико-электронных дальномерах, // Приборостроение. 1986. Т 29, №9, С. 79 – 83.
- 7) Иванов А.П. Физические основы гідрооптики. Минск: Наука и техника, 1975, 504с.
- 8) Лазерная дальнометрия / Л.А. Аснис, В.П. Васильев, В.Б. Волконский и др.: под ред. В.П. Васильева и Х.В. Хинрискуса. Москва: Радио и связь, 1995. – 256 с.
- 9) Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб. Пособие/ В.Г. Бокшанский, Д.А. Бондаренко, М.В. Вязовых и др; под ред. В.Е. Карасика.– Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 92 с.
- 10) Основы импульсной локации./ В.И. Козинцев, М.Л. Белов, А.М. Орлов и др. под ред. В.Н. Рождествина. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 512 с.

- 11) Безносенко И.В. Вынужденное комбинационное рассеяние в приложении источников полуторамикронного излучения / Безносенко И.В., Мачехин Ю.П. // Прикл. радиоэлектроника. 2014. Т.13, № 4. – С. 406 – 419.
- 12) Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов. Ленинград : Машиностроение, 1982.
- 13) Основы проектирования лазерных локационных систем / М.С. Малашин, Р.П. Каминский, Ю.Б. Борисов. – Москва: Высшая школа. 1983. 207 с.
- 14) Абрамов А.И., Бельский А.Б. Разработка лазерных дальномеров-биноклей на Красногорском заводе им С.А. Зверева // Оптический журнал. – 2009,. №8. С. 18-21
- 15) [Электронный ресурс] – <https://findpatent.ru/patent/235/2352957.html>
(дата зверенения: 15.11.2019 г.)