

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

А.Г. ПРОТАСОВ

« ___ » _____ 2021 р.

Дипломний проект

**на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології неруйнівного контролю і діагностики»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
на тему: «Лазерний далекомір»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ПК-71

Мисниченко Микита Андрійович _____

Керівник:

Ст. викладач, к.т.н.,

Богдан Галина Анатоліївна _____

Рецензент:

Ст. викладач, к.т.н.,

Богдан Галина Анатоліївна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2021 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	ПК 71.100000.000 ПЗ	Пояснювальна записка	60	
3	A2	ПК 71.100000.00 СС	Структурна схема	1	
4	A2	ПК 71.100000.00 СФ	Функціональна схема	1	
5	A1	ПК 71.100000.00 СЕ	Принципіальна схема	1	
6	A1	ПК 71.100000.00 СК	Складальне креслення	1	
7	A1	ПК 71.100000.00 ЛЗ	Оптична схема	1	
8	A2	ПК 71.100000.01	Корпус	1	
9	A3	ПК 71.100400.01	Втулка	1	
10	A4	ПК 71.100100.01	Оправка	1	
11	A4	ПК 71.100200.00 СК	Передавальна система	1	
12	A4	ПК 71.100200.01	Втулка	1	
13	A4	ПК 71.100401.00 СК	Вхідне вікно	1	
14	A4	ПК 71.100401.02	Плоско-паралельна пластина	1	
15	A4	ПК 71.100401.01	Дзеркало сферичне	1	
16	A4	ПК 71.100400.02	Дзеркало сферичне	1	
17	A4	ПК 71.100000.00	Специфікація №1	1	
18	A4	ПК 71.100100.00	Специфікація №2	2	
19	A4	ПК 71.100200.00	Специфікація №3	1	

				ПК 71.100000.000ПЗ		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Розробн.	Мисниченко М.А.				1	1
Керівн.	Богдан Г.А.				КПІ ім. Ігоря Сікорського ПК-71	
Консульт.	Богдан Г.А.					
Н/контр.						
Зав.каф.	Протасов А.Г.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту
на тему: «Лазерний далекомір»**

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет

Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

А.Г. ПРОТАСОВ

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Мисниченко Микита Андрійович

1. Тема проекту «Лазерний далекомір», керівник проекту ст. викладач, к.т.н., Богдан Галина Анатоліївна, затверджені наказом по університету від «26» травня 2021 р. №1347-с
2. Термін подання студентом проекту _____
3. Вихідні дані до проекту: діапазон вимірювання від 0,25 м до 15; похибка вимірів не більше 1см; потужність лазерного випромінювання не більше 5 мВт
4. Зміст пояснювальної записки
 - I. Аналітичний огляд
 - II. Лазерний фазовий далекомір
 - III. Розрахункова частина
 - IV. Розробка і обґрунтування конструкції приладу
 - V. Висновок
 - VI. Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Складальний кресленик	Богдан Г. А.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз видів далекомірів		
2	Обґрунтування вибору лазерного фазового далекоміру		
3	Постановка завдання		
4	Вибір структурної схеми		
5	Розрахунок всіх елементів		
6	Проектування далекоміра		
7	Оформлення дипломного проекту		
8	Підбиття підсумків		

Студент

МИСНИЧЕНКО М.А.

Керівник

БОГДАН Г.А.

Анотація

Далекоміри повсякчас були тісно пов'язані з неруйнівним контролем, оскільки допомагали визначати відстань до важкодоступних ОК або тих, контроль яких можливий лише на відстані.

В дипломному проекті були описані існуючі сучасні далекоміри, типи їх дії, проаналізовано наступні далекоміри: ультразвуковий, лазерний, оптичний та нитяний. Було виконано порівняння перелічених далекомірів в ході якого виявлено основні переваги та недоліки кожного.

Мета роботи: розробка лазерного фазового далекоміру. Було поставлено задачі щодо пристрою, що при вивченні існуючих методів його реалізації, дало змогу виявити найкращий спосіб при якому недоліки будуть незначними в порівнянні з перевагами. Так за структурною схемою основного методу було обрано компоненти для побудови функціональної та електричної принципіальних схем, а також виконано креслення корпусу та оптичної системи далекоміра.

Дипломний проект складається із пояснювальної записки обсягом 60 сторінок, включає 13 ілюстрацій, 1 таблицю, 16 креслеників та більше 60 формул.

Abstract

Rangefinders have always been closely associated with non-destructive testing, as they helped to determine the distance to hard-to-reach OKs or those whose control is possible only at a distance.

The diploma project described the existing modern rangefinders, their types of action, analyzed the following rangefinders: ultrasonic, laser, optical and filament. A comparison of these rangefinders was performed, during which the main advantages and disadvantages of the skin were revealed.

Purpose: development of a laser phase rangefinder. Problems were set regarding the device, which, while studying the existing methods of its implementation, made it possible to identify the best way in which the disadvantages will be insignificant in comparison with the advantage. So according to the block diagram of the main method It was turning components for the construction of functional and electrical schematics, as well as performed drawings of the body and optical system of the rangefinder.

The diploma project consists of an explanatory note of 60 pages, includes 13 illustrations, 1 table, 16 drawings and more than 60 formulas.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	11
1.1. Види далекомірів за принципом дії	11
1.1.1 Далекіміри активної дії	12
1.1.2 Далекіміри пасивної дії	15
1.2. Актуальність вибраної теми	19
РОЗДІЛ 2. ЛАЗЕРНИЙ ФАЗОВИЙ ДАЛЕКОМІР	22
2.1. Принцип дії	22
2.2. Аналітичний огляд лазерів	36
2.3. Фізико-математична модель приладу	40
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	43
3.1. Габаритний розрахунок приладу	43
3.2. Енергетичний розрахунок приладу	48
3.3. Розрахунок потоку, що потрапляє на фотоприймач	51
3.4. Розрахунок відношення «сигнал/шум» на виході фотодіода	53
3.5. Розрахунок похибок фазометра	57
3.6. Розрахунок похибки вимірювання	58
3.7. Розрахунок елементів Т-подібного мосту	59
РОЗРОБКА І ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИЛАДУ	61
ВИСНОВКИ	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64

					ПК71.100000.000 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Мисниченко М.А.			Імпульсний лазерний далекомір			Літ.	Арк.	Акрушів		
Перевір.									8			
Реценз.								ПБФ, гр. ПК-71				
Н. Контр.												
Затверд.												

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ОК – об'єкт контролю

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

АЧ – амплітудно-частотна

ФЧ – фазо-частотна

НІХ – фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою

ДНП – допоміжний нульовий промінь

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		

ВСТУП

Пристрої повсякчас допомагають керувати та вимірювати об'єкти досліджень та на даний час охопили всі можливі сфери життєдіяльності людини. Використання їх значно спрощує роботу, дає більш точні та швидкі результати. Одним з таких пристроїв є далекомір – інструмент, представлений безліччю видів і варіантів виконання.

Далекомір - це пристрій, який призначений для визначення точної відстань від спостерігача до конкретного об'єкта. Головна перевага – це можливість обчислити відстань до недоступного об'єкта при цьому робити це гранично швидко.

Без далекоміра складно уявити сучасне будівництво та геодезію, але область застосування приладу цим не обмежується. Використовують далекоміри в різних галузях промисловості і виробництва, також не обходяться в господарській діяльності. Застосовуються в будівництві при розбивці і для визначення обсягів, при астрономічних дослідках, фотографії для фокусування ,навігації та дизайні, у військовій промисловості та мореплаванні, побудові гідротехнічних споруд, доріг, зведенні ліній електропередачі , а так само в різних видах активного відпочинку - полювання, туризм, грі в гольф. Бюро технічної інвентаризації використовують їх при інвентаризації житлового фонду та промислових об'єктів. При виробництві топографічних робіт лазерні далекоміри використовуються для різного роду додаткових обмірів і при складанні абрисів.

Сучасні апарати, використовуючи останні досягнення в розробці програмного забезпечення та виробництві мікропроцесорів, мають можливість проведення більш складних операцій, ніж просто фіксація результатів вимірювань. Так, наприклад, вони можуть розраховувати площу вимірюваної території, а також кутові координати цілі.

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Види далекомірів за принципом дії

Всі далекоміри за принципом роботи поділяються на активні і пасивні.

Активні за допомогою об'єктива наводяться на точку, до якої необхідно виміряти відстань, після відправляють на неї світловий або звуковий сигнал. Досягнувши поверхні предмета, сигнал відбивається від поверхні об'єкту і повертається до чутливого елемента, який уловлює хвилю і розраховує відстань до об'єкту на основі часу, що пройшла хвиля. Швидкість з якою даний сигнал поширюється попередньо відома (звукова та світлова швидкість).

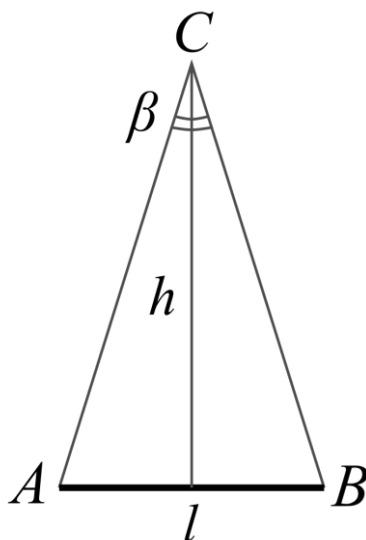


Рис. 1.1 Рівнобедрений трикутник

До активних належать:

- звуковий далекомір
- світловий далекомір
- лазерний далекомір
- інші

Пасивні не посиляють сигналів. Визначення відстані здійснюється за зовсім іншим принципом та працюють за законами геометрії. За допомогою пасивних далекомірів будується рівнобедрений трикутник (рис. 1), за параметрами якого можна вирахувати відстань. Наприклад по відомій стороні

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$AB = l$ (базі) і протилежного гострого кута b (паралактичний кут). При малих кутах b (виражених в радіанах):

$$h = l / b \quad (1.1)$$

Величини l або b , зазвичай є сталою, а інша - змінною (вимірюваною). За цією ознакою поділяють далекоміри, що з постійним кутом і ті, що з постійною базою.

$AB = l$ - відстань між об'єктами далекоміра (база далекоміра)

C - об'єкт, до якого необхідно знайти відстань

h - відстань між далекоміром і об'єктом спостереження

До пасивних належать:

- оптичний далекомір
- нитяний далекомір
- інші

1.1.1 Далекіміри активної дії

Ультразвуковий далекомір

Пристрій працює на основі магнітострикційного або п'єзоелектричного перетворювача. Далекімір такого типу розраховує відстань за допомогою поширення електромагнітної хвилі, швидкість якої відома в конкретному вимірюваному середовищі [1, 2]. Для повітря приблизно 340 м / с. Принцип роботи полягає в випусканні звукових хвиль до об'єкту, відбивається від даного предмета і зчитується чутливим елементом. Звук має знаходитися за межами діапазону сприйняття людського вуха. Швидкість поширення звуку в повітрі має певне значення при фіксованій щільності, що дає змогу визначити відстань. У міру вдосконалення знань людини і виробничих технологій, модифікувалася і конструкція далекомірів. Наприклад, для більш точного напрямку звукового сигналу на ОК, до якого потрібно виміряти відстань, була

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

добавлена лазерна вказівка, що значно підвищило зручність та точність наведення на ціль до якої необхідно виміряти відстань [3].

З сучасними досягненнями в виробництві мікропроцесорів та програмного забезпечення, далекоміри в змозі проводити більш складні операцій, так, наприклад, не тільки фіксування результатів вимірювань, а навіть розрахунок площі вимірювання, визначення кутових координат до цілі та багато іншого.

При цьому потрібно відзначити суттєві недоліки та переваги, які притаманні приладів, що працюють з використанням ультразвукової локації. В першу чергу це стосується точності вимірювання, яка визначається середовищем, в якій поширюється ультразвук. Її характеристики і їх значення, в першу чергу щільності, не є постійними і можуть змінюватися в процесі проведення вимірювальних робіт (швидкість, з якою поширюється звук, зростає зі збільшенням щільності середовища).

До інших недоліків можна віднести обмеженість по відстані виміру. Мінімальна дистанція для даних приладів складає 0,3 м, а максимальна 20 м. Але основним недоліком ультразвукового далекоміра є сама природа звуку, а точніше його особливості поширення. Слід пам'ятати, що звук має хвильову природу та якщо на шляху хвилі буде знаходитися перешкода то звук відбитий від неї може досягти приймача раніше звуку відбитого до ОК. Тому ультразвуковим далекоміром досить складно проводити вимірювання кутів та діагоналей.

Крім того, матеріал ОК теж впливає на вимірювання, оскільки м'які матеріал більше поглинають звукову хвилю ніж тверді. Це негативно позначається на точності вимірювального приладу.

Вплив навколишнього середовища. Точність вимірювання відстані безпосередньо залежить від щільності повітря і вміст у ньому вологи. Чим вище щільність, тим довше звукова хвиля буде проходити крізь простір, а значить отримані дані будуть вельми неточними. Через це не рекомендується користуватися приладом в сиру погоду на вулиці.

					<i>ПК71.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		<i>13</i>

Перевагою над іншими далекомірами є те, що такий далекомір здатний виміряти відстань до об'єкту, що пропускає або спотворює світло, наприклад, скло чи люстерко. Також це більш дешевший варіант, ніж лазерні далекоміри та його використання інтуїтивно зрозуміле, а з наявністю лазерної вказівки більш комфортне.

Лазерний далекомір

Лазерний далекомір є більш універсальним, ніж ультразвуковий, і використовується для більш серйозних задач, оскільки він значно точніший ніж ультразвуковий далекомір та має великий функціонал щодо вимірювання та розрахунку середньої відстані, площі та об'єму, нахилу та кутів, тощо.

Принцип роботи цього приладу схожий з ультразвуковим: з активного елемента подається лазерний імпульс, який відбиваючись від об'єкта, повертається на приймач (чутливий елемент). Час, витрачений на проходження відстані, дозволяє вирахувати його з точністю до міліметра. Лазерні далекоміри призначені для вимірювання відстаней в досить-таки широкому діапазоні: ближня межа становить 0,02 - 0,03 м, а дальня – 100-200 м і більше, в залежності від варіантів реалізації досягає 10 000 м при точності ± 10 м. Точність вимірювання при 0,02-200м дуже висока: у моделей простіше – ± 3 мм, а у професійних – $\pm 1,5$ мм. Для точного вимірювання рекомендовано притиснути однією стороною до точки відліку (наприклад, стіни), або використовувати спеціальний штатив чи інше обладнання.

Звичайно ж, ці інструменти мають ряду недоліків. В першу чергу необхідно звертати увагу на те, що технічні можливості лазерних далекомірів в яскравий сонячний день значно знижуються. Наприклад, замість декларованих виробником 100-200 м, реально, як показує практика, можна вимірювати максимум 30-50 м. Пов'язано це з тим, що спектри сонячного випромінювання і лазерного сигналу кілька "перетинаються", і відбитий сигнал слабшає.

Крім цього, дальність роботи визначається і поглинанням поверхні предмета, відстань до якого вимірюється. Для отримання паспортної дальності

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

слід використовувати спеціальні світловідбивачі, які в комплект лазерної рулетки не входять, а продаються окремо. Вони необхідні для того, щоб сигнал відбився без великого поглинання поверхні ОК.

Також виникають деякі складнощі при роботі зі склом і люстерками. Скло здатне пропускати лазерний промінь і тоді показання вимірів стають некоректними.

Перевагою серед інших є найкраща точність ($\pm 1-5$ мм) та дальність виміру (від 30 до 10 000 метрів) серед інших, можливість вимірювання відстаней навіть до дуже маленьких об'єктів, наприклад, капелюшки цвяха. Крім того сучасні лазерні далекоміри забезпечені і додатковими функціями, великий обчислювальний функціонал навіть у найпростіших моделей: площа, обсяг, теорема Піфагора і т.д., досить значний обсяг внутрішньої пам'яті, можливістю підключення до комп'ютера. Пристрій стабільно працює в жарку або холодну погоду. Також на нього не так сильно впливає щільність повітря, як на ультразвукові.

1.1.2. Далекіміри пасивної дії

Оптичний далекомір

Далекіміри пасивної дії також називаються далекомірами геометричного типу. За допомогою цього типу далекомірів визначення відстані до цілі проводиться шляхом вимірювання одного з елементів "далекімірного" трикутника, одна зі сторін якого є відстанню до цілі. При цьому частина елементів трикутника є постійними.

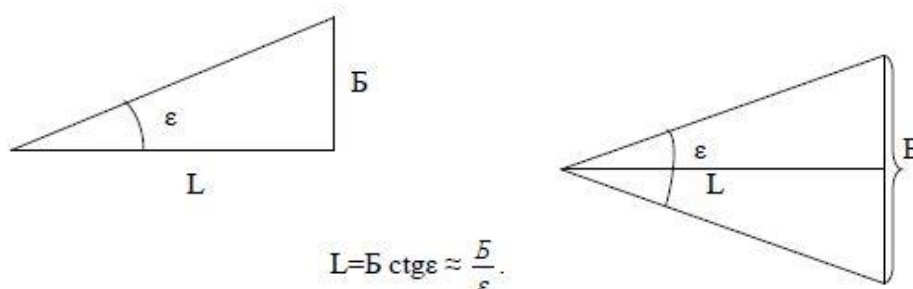
Такі пристрої часто використовують геодезисти, оскільки інструмент підтримує вимірювання на досить далекі відстані. При необхідності здійснювати топографічні роботи краще вибрати обладнання цього типу. Такі прилади працюють за всім відомій теоремі Піфагора, що є однією з найголовніших в геометрії.

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		15

Оптичні далекоміри не мають датчика, який автоматично визначає відстань. Дивлячись в окуляр оптичного далекоміра потрібно візуально зафіксувати дані спеціальної шкали, тому отримання похибки є неминучою.

Хоча оптичні далекоміри і вельми вдалий варіант для далеких вимірів, але якщо потрібно виміряти відстань до об'єкта з рельєфною поверхнею, наприклад прямовисній скельної стіни, то при погляді через зорову трубку дана поверхня буде виглядати звичайною площиною. В результаті отримані параметри дистанції будуть мати значну похибку і показана відстань – середня до площини ОК, а не до певної точки відліку.

Оптичні далекоміри бувають монокулярні та стереоскопічні. Їх принцип роботи трохи відрізняється, оскільки перші дозволяють обчислювати відстань використовуючи геометричні формули для прямокутного трикутника, а другі для рівнобедреного.



*Рис. 1.2 Принцип вимірювання довжини лінії
далекомерами геометричного типу*

Монокуляр коштує дешевше, ніж далекомір з двома зоровими трубками. Крім цього він менш зручний, оскільки викликає стомлення оператора. Дивитися через стереоскопічні далекоміри комфортніше, а крім цього вони здатні визначити відстань до об'єкта, що рухається.

Одну з величин приймають постійною, іншу вимірюють. Залежно від цього оптичні далекоміри бувають:

- з постійним паралактичним кутом і зі змінною базою у вигляді вертикальної рейки, яка встановлюється поза приладом (або нитяною далекомір).

- з постійною базою зі змінним паралактичним кутом (або далекоміри подвійного зображення).

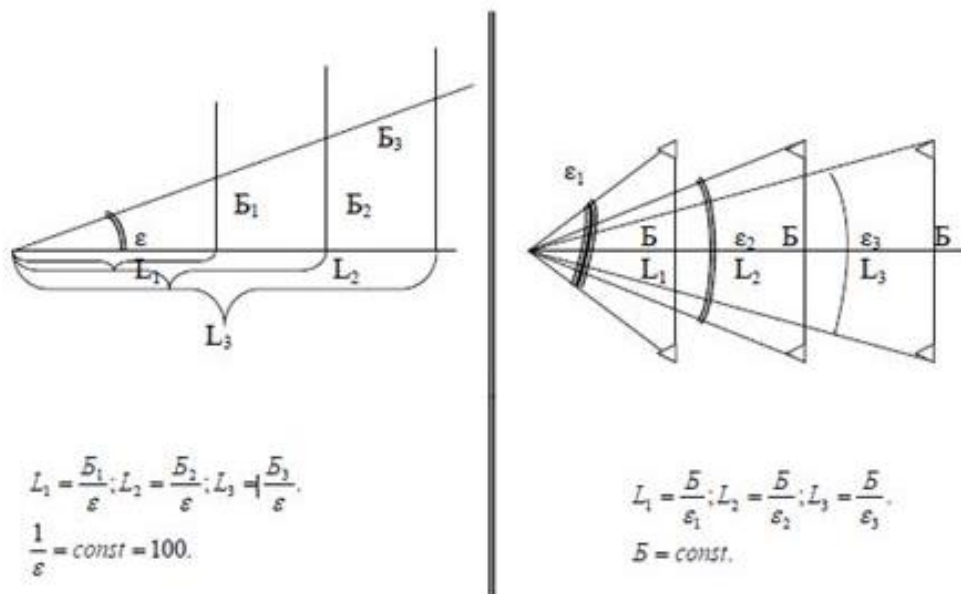


Рис. 1.3 Принцип вимірювання довжини лінії далекомірами різного типу

Перевагами оптичних далекомірів є його лідерство в дальності вимірювання серед всіх далекомірів, але вона залежить від фокусування, що впливає на точність. Також вони мають більш великий рівень захисту від впливу середовища. Недоліком є більш низька точність, що присутня всім далекомірам пасивної дії. При вимірюванні нечітких поверхонь як, наприклад, скеля, яка має складну структуру, ви не отримаєте досить точних результатів.

Нитяний далекомір

Нитяний далекомір відноситься до оптичних далекомірів з постійним паралактичним кутом і змінним вимірюваним базисом, і являє собою, в найпростішому випадку, два додаткових горизонтальних штриха на сітці ниток зорової труби геодезичного приладу (симетричних відносно перехрестя сітки ниток). Такі додаткові горизонтальні штрихи на сітці ниток називаються далекомірними нитками.

При роботі з нитяним далекоміром в якості базису (візирної цілі) встановлюється вертикально в кінці вимірюваної лінії оцифрована лінійна

шкала (як правило, це нівелірна рейка). Зорова труба геодезичного приладу наводиться на шкалу і по далекомірним нитям роблять поділки по цій шкалі.

Різниця поділок дає довжину базису, відповідно задається нитяним далекоміром паралактичного кута. По рейці, розділеної на сантиметри, відстань визначають наступним чином: з відліку по верхньої нитки в міліметрах віднімають відлік по нижньої нитки, різницю переводять в метри і по формулі (1.2) визначають довжину лінії. При вимірі похилих ліній необхідно вводити поправку за нахилом лінії, формула (1.3):

$$D = 100 \cdot b, \quad (1.2)$$

$$D = D_H \cdot \cos^2 v, \quad (1.3)$$

де, D_H - довжина похилої відстані;

v - кут нахилу лінії.

Теорія нитяного далекоміра дуже проста. Чим ближче буде знаходитися використовувана лінійна шкала для наведення зорової труби, тим менший її відрізок буде потрапляти в проміжок між далекомірними нитками, і, навпаки, чим далі буде шкала – тим більше буде цей відрізок. Причому довжина такого вимірюваного базису буде прямо пропорційна його віддаленості від геодезичного приладу. Інакше кажучи, визначеної довжини базису буде відповідати цілком певну відстань до нього. Ця відстань може бути легко розрахована по довжині вимірюваного базису, якщо знати коефіцієнт нитяного далекоміра (коефіцієнт пропорційності між довжиною базису і відстанню до нього).

Спочатку беруть відлік, який показує кількість видимих через зорову трубу сантиметрів, які поділяють проекції ниток. Коефіцієнт далекоміра приймається рівним 100. Судячи з наявної інформації, точність оптичних нитяних далекомірів складає близько 1: 400 (0,25%) вимірюваного відстані. Для більш точного проміру довгих ліній радять розбивати їх на відрізки по 50-100 м. При такому підході похибка скорочується в 1,5-2,5 рази.

Точність, в основному, обмежена мінливістю ефективної фокусної відстані зорової труби з внутрішнім фокусуванням, тобто зміною положення

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		18

точки фокуса зорової труби (вершини паралактичного кута) при її фокусуванні на різні відстані. Тому вони використовуються тільки для допоміжного визначення відстаней, де точність не грає важливої ролі, наприклад, для визначення відстаней від нівеліра до рейок при вимірюванні перевищень (тобто коли вимірюються перевищення, а знання відстаней від нівеліра до рейок дозволяє лише правильно організувати методику відповідних висотних вимірювань). У попередні роки нитяною далекомір ще використовувався і для визначення відстаней при виробництві топографічної зйомки (в основному, зйомки рельєфу, де висока точність у вимірюванні відстаней не потрібна).

Основними недоліками при роботі з нитяними далекомірами є достатньо низька точність в порівнянні з іншими видами, швидкість вимірювання, яка залежить від самого оператора. Як і оптичний далекомір не здатен точно виміряти відстань до нечітких поверхонь. До переваг можна виділити велику дальність вимірювання в порівнянні з лазерним та ультразвуковим далекомірами. Нитяний далекомір відносно легкий в використанні та має нескладну конструкцію, що дає можливість зробити такий його самому.

1.2. Актуальність вибраної теми

Серед всіх вивчених мною далекомірів я віддав перевагу фазовому лазерному далекоміру, тому що вважаю, що він являється універсальним і дуже поширеним в промисловості, побуті та інших сферах. Основними критеріями при виборі виду далекоміра та його методу реалізації є відносна точність, швидкість вимірювання та компактність.

Перш, ніж з'явилися лазерні далекоміри, було багато оптичних далекомірів, точність яких варіюється в залежності від відстані та які часто давали суперечливі показання від одного користувача до іншого. Вони також були великими і громіздкими, досить повільно працювали. Лазерний

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

далекомір в порівнянні з оптичним далекоміром здатний показати значно вищу продуктивність і точність. До того ж він має набагато менший розмір.

Є багато типів лазерних далекомірів. Легко помітити, що деякі лазерні далекоміри пропонують більш широкий діапазон, ніж інші: деякі діють на 400метрів, інші 800 метрів і деякі з них з точністю до відстаней, що перевищують кілометр. Діапазон далекоміра залежить від комп'ютерної мікросхеми або датчика, який обробляє інформацію про відстань.

Спочатку аргументую чому вибрано метод фазового методу вимірювання серед між трьома методами вимірювання дальності в залежності від того, який характер модуляції лазерного випромінювання використовується в далекоміри: імпульсний, фазовий чи фазо-імпульсний.

Суть імпульсного методу вимірювання полягає в тому, що до об'єкту посилають імпульс, він же запускає тимчасовий лічильник в далекомірі. Коли відбитий об'єктом імпульс приходить до далекоміру, то він зупиняє роботу лічильника. За часового інтервалу автоматично висвічується перед оператором відстань до об'єкта. Похибка такого методу вимірювання 30см. Зарубіжні фахівці вважають, що для вирішення ряду практичних завдань це цілком достатньо.

При фазовому методі вимірювання лазерне випромінювання модулюється за синусоїдальним законом. При цьому інтенсивність випромінювання змінюється в значних межах. Залежно від дальності до об'єкта змінюється фаза сигналу, що впав на об'єкт. Відбитий від об'єкта сигнал прийде на приймальній пристрій також з певною фазою, що залежить від відстані. Оцінимо похибку фазового далекоміра, придатного працювати в польових умовах. Фахівці стверджують, що оператору (не дуже кваліфікованому) не складно визначити фазу з помилкою не більше одного градуса, отже похибка становитиме приблизно 5см.

При фазовому методі вимірювання точність буде значно більшою оскільки вимірюється фаза та хоч для більш точних вимірів необхідно декілька більше часу, він поступає швидкістю вимірювання імпульсному методу де

					<i>ПК71.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						<i>20</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		

вимірюється час від початку зондуючого сигналу до сприйняття донного. Також фазовий метод має менший потенціал при вимірюванні на великі відстані в порівнянні з імпульсним, але для поставленої задачі він повністю підходить. Ще цей метод надає можливість, наприклад, модифікуванні далекомір для використання його в режимі вимірювання в реальному часі, що може бути корисним.

Щодо типу дії безумовно активний тип дає змогу робити більш швидкі та точні виміри оскільки ці прилади автоматизовані і все залежить від компонентів та мікросхеми, але декілька поступається дальністю вимірювання. При пасивному типу дії швидкість та точність є індивідуальною, оскільки вимірювання виконує користувач та все залежить від його досвіду та практики.

В порівнянні лазерного далекоміра з ультразвуковим варто згадати, що лазерний далекомір має змогу вимірювати скрізь прозорі об'єкти такі як, наприклад, скло, але в залежності від ситуації лазер може заломитися, що впливатиме на точність вимірювання. Щодо ультразвукового далекоміра, сигнал, звук, буде відбиватися від таких об'єктів, що може бути більш важливим в залежності від поставленої задачі. Цей критерій залежить від поставлених задач до пристрою. Також обидва далекомірів мають деякі проблеми при вимірюванні на відкритих місцевостях. На лазер впливатиме сонячна погода, яка буде слабшати його інтенсивність, а на ультразвук впливатиме вологість та щільність повітря. Але при цьому лазерний далекомір є більш точним та має більшу відстань вимірювання, що залишає ультразвукові далекоміри поза конкуренцією.

Також слід нагадати про велику кількість модифікацій, які можливі з використанням лазера та мікропроцесору який здатен реалізувати складні розрахунки, від визначення кутової відстані, кута нахилу, площини та триангуляції з отриманням тривимірного зображення.

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Отже, з вищенаведеного порівняння та великою кількістю переваг над недоліками фазовий лазерний далекомір задовольняє поставленні критерії щодо відстані, швидкості та точності вимірювання, та компактності.

РОЗДІЛ 2. ЛАЗЕРНИЙ ФАЗОВИЙ ДАЛЕКОМІР

2.1. Принцип дії

На відміну від імпульсних далекомірів, лазерні фазові далекоміри мають істотно меншу дальність вимірювання, але при цьому набагато більшу точність вимірювань. Це можливо завдяки тому, що джерелом випромінювання в лазерних фазових далекомірах виступає безперервний напівпровідниковий лазер або світлодіод, випромінювання якого промодульовано одним або декількома гармонійними сигналами.

У лазерних фазових далекомірах відстань визначається порівнянням фази модульованого сигналу на виході з приймача випромінювання (фаза випромінювання, яке пройшло відстань до об'єкта і назад) з фазою опорного сигналу (фазою сигналу на джерелі випромінювання).

Відстань, яку проходить світлова хвилю за час t , дорівнює

$$l = ct \quad (2.1)$$

де c - швидкість світла.

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

$$\varphi = 2\pi f_m t \quad (2.2)$$

де f_m - частота модуляції випромінювання.

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

З виразів (2.1) і (2.2) слідує, що дальність до об'єкта можна визначити наступним чином

$$l = c \frac{\varphi}{2\pi f_m} \quad (2.3)$$

При вимірюванні фази виникає похибка $\Delta\varphi$. Відповідна похибка при вимірі відстані Δl дорівнює

$$\Delta l = c \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_m} \quad (2.4)$$

Проаналізувавши формулу (2.4) можна зрозуміти, що похибка вимірювання дальності Δl тим нижче, чим вище частота модуляції, але для однозначного визначення дальності зміна фази φ на вимірюваній відстані повинна бути менше 2π , тобто подвійна відстань не повинна перевищувати довжину хвилі модуляції, що в наслідок обмежує максимально допустиме значення частоти модуляції f_m . Зазвичай, в далекомірах використовують не одну, а кілька частот модуляції. Максимальною дальністю вимірювання визначається низька частота, наступні – похибкою вимірювання на попередній частоті (аналогічно низькій частоті, похибка більш низької частоти не повинна перевищувати довжину хвилі модуляції наступної частоти). Остання частота модуляції визначається похибкою $\Delta\varphi$ і необхідною точністю вимірювань з рівняння (2.4).

Інтегральні фазові детектори, що використовуються в далекомірах, вимірюють різницю фаз між вхідним і опорним сигналами від 0° до 180° але при більшому діапазоні виникає неоднозначність. У цьому випадку необхідно, щоб фаза змінювалася на величину φ , що не перевищує π , при проходженні випромінюванням відстані до об'єкта і назад, тобто щоб половина довжини хвилі частоти модуляції відповідала подвійній відстані до об'єкта (рис. 2.1). Максимальна дальність визначиться за наступною формулою

$$2l_{max} \leq \frac{1}{2} T_1 c \quad (2.5)$$

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		23

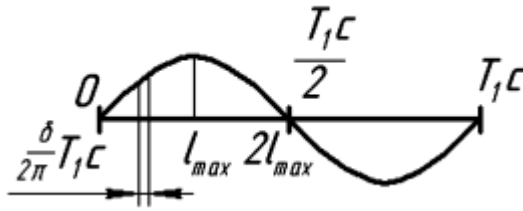


Рис. 2.1. Схематичне зображення одного періоду модулюючого випромінювання і його співвідношення з вимірюваною дальністю

де T_1 – період модуляції випромінювання на першій (низькій) частоті.

Звідси перша частота модуляції має наступний вигляд

$$f_{1m} \leq \frac{c}{l_{max}} \quad (2.6)$$

Для фазових детекторів похибка вимірювання фази за допомогою аналогових інтегральних фазометрів становить $0,5^\circ \dots 1,0^\circ$.

Якщо похибка істотно перевищує необхідну, потрібно використовувати ще одну, більш високу частоту модуляції. Щоб визначити відстань необхідно, щоб похибка на першій частоті модуляції не перевищувала половину довжини хвилі другої частоти модуляції, тобто

$$\Delta l_1 \leq \frac{1}{2} T_2 c \Rightarrow f_{2m} \leq \frac{c}{2 \Delta l_1} \quad (2.7)$$

де T_2 – період модуляції випромінювання на другий частоті.

На частоті F_{2m} похибка вимірювання відстані складе

$$\Delta l_2 = \frac{c \delta \varphi_2}{2 \pi f_2} \quad (2.8)$$

Оскільки вихідне значення є половиною вимірної відстані, його похибка також менше в 2 рази. В даному випадку вона складатиме $\Delta l_2 / 2$.

При вимірюванні на частотах F_{1m} і F_{2m} також отримаємо значення зсуву фаз φ_1 та φ_2 . На рис. 2.2.представленно схематичне зображення процесу

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

поширення модульованого лазерного випромінювання. Відстань до об'єкта і назад відповідає частині хвилі низькочастотної модуляції:

$$l = \frac{c\varphi_1}{2\pi f_{1m}}$$

Відстань до об'єкта і назад відповідає N цілим довжинах хвиль високочастотної модуляції і деякої дробової частини:

$$l = N \frac{c}{f_{2m}} + \frac{c\varphi_2}{2\pi f_{2m}}$$

Повне значення відстані до об'єкта визначають з вирішення наступної системи рівнянь

$$\begin{cases} l = \frac{c\varphi_1}{2\pi f_{1m}} \\ l = N \frac{c}{f_{2m}} + \frac{1}{2} \frac{c\varphi_2}{2\pi f_{2m}} \end{cases} \quad (2.9)$$

де N знаходять як цілу частину з виразу

$$\frac{f_{2m}}{4\pi} \left(\frac{2\varphi_1}{f_{1m}} - \frac{\varphi_2}{f_{2m}} \right)$$

Після знаходять відстань до ОК за формулою

$$l = N \frac{c}{f_{2m}} + \frac{1}{2} \frac{c\varphi_2}{2\pi f_{2m}}$$

Недоліком даного принципу побудови далекоміра є висока частота модуляції сигналу F_{2m} . Також можуть знадобитися три і більше частоти модуляції при великій відстані до зондуємого об'єкту і одночасно високої точності вимірювань (на рівні 1.. .5 мм), що в свою чергу призводить до високого рівня шумів в електронному тракті. Це значно знижує точність вимірювань, також ускладнює електричну схему.

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

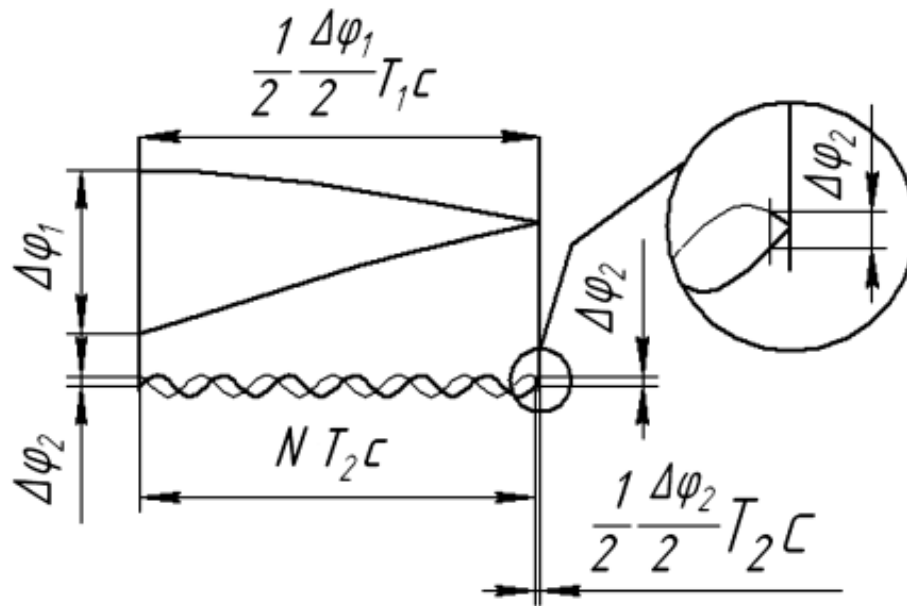


Рис. 2.2. Ілюстрація процесу поширення модульованого лазерного випромінювання

На рис. 2.3 запропонована функціональна схема двухчастотного лазерного фазового далекоміра, що реалізує класичний принцип дії. На виході генераторів формуються два сигнали у вигляді орнаментів з частотою $F_{1м}$ і $F_{2м}$. Ці сигнали логічно перемножуються і подаються на драйвер лазера, який, в свою чергу, модулює струм накачування напівпровідникового лазера. Крім того, в якості опорних напруг, ці сигнали надходять через вузькосмугові фільтри на два фазових детектора.

Після відбиття від зондуемого об'єкта модулювання 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 $F_{1м}$ і $F_{2м}$. З прийнятого сигналу складної форми після виділяються дві гармоніки, які далі надходять на робочі входи відповідних фазових детекторів.

На виходах фазових детекторів формуються напруги, пропорційні зміщення фаз φ_1 та φ_2 , які згодом оцифровуються за допомогою АЦП. В наслідок отримуємо два двійкових числа з розрядністю b_1 і b_2 .

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

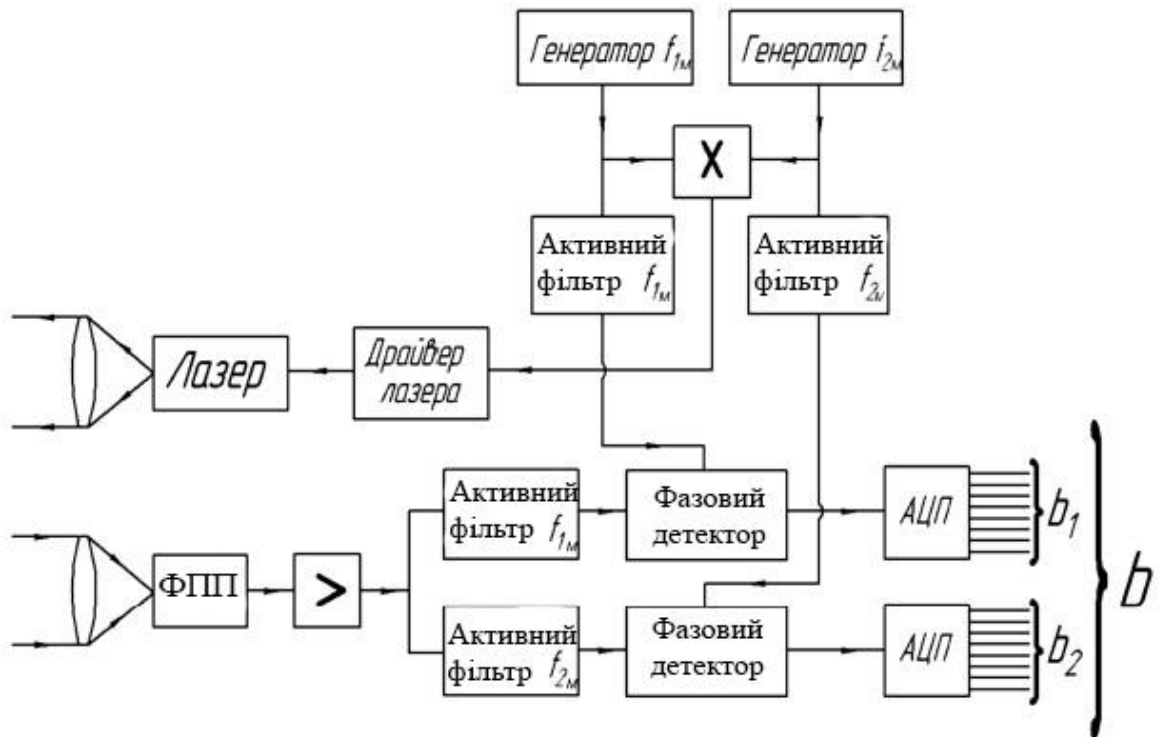


Рис. 2.3. Функціональна схема лазерного фазового далекоміра

Перше число сильно кажучи є дальністю, а друге число – його уточненням до значення необхідної похибки. Для отримання підсумкового результату числа b_1 і b_2 з'єднують 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 грубій умові дальності:

$$2^{b_1} \geq \frac{l_{max}}{\Delta l_1} \quad (2.10)$$

У свою чергу, розрядність b_2 повинна бути уточненням дальності до величини необхідної похибки:

$$2^{b_2} \geq \frac{\Delta l_1}{\Delta l_2} = \frac{c}{4f_{2m}\Delta l_2} \quad (2.11)$$

Розглянемо напругу, що подається на драйвер лазера і відповідно перетворюється лазером в оптичне випромінювання.

На виходах генераторів формуються меандри з частотами $F_{1м}$ і $F_{2м}$. Ці сигнали надходять в помножувач, позначений на функціональній схемі знаком «X» (див. рис. 2.3).

Після перемноження результуюча напруга має вигляд наступної функції:

$$U(t) = \text{comb}\left(\frac{t}{T_2}\right) \text{comb}\left(\frac{t}{T_1}\right) \quad (2.12)$$

Кількість імпульсів можна визначити за наступною формулою

$$n = \frac{T_1}{2T_2} = \frac{f_2}{2f_1} \quad (2.13)$$

Фазовому детектору необхідна певна кількість імпульсів для визначення різниці фаз сигналів. Для більшості існуючих фазових детекторів число n не повинно бути менше 50.

На рис. 2.4 представлені графіки сигналів, що пояснюють роботу лазерного фазового далекоміра.

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.

Існують наступні методи вимірювання різниці фаз: 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 АЧ і ФЧ характеристиками за допомогою перетворення Гілберта для мінімально-фазових ланцюгів. Однак всі перераховані методи мають наступні недоліки:

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

- точність результату сильно знижується при вимірюванні різниці фаз зашумлених сигналів; так що в деяких випадках практично неможливо відновити фазу перешкоди сигналу;

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

Далі буде описаний цифровий метод який, практично позбавлений недоліків. Метод перемножування двох гармонійних сигналів – опорного і прийнятого – з подальшим виділенням фазової компоненти.

Нехай $s_1 = A_1 \sin(\omega t + \Delta\varphi)$ – прийнятий сигнал, отриманий з вимірювального ланцюга, і $s_2 = A_2 \cos(\omega t)$ - опорний сигнал.

Після перемноження отримаємо наступний вираз

$$s_1 s_2 = A_1 \sin(\omega t + \Delta\varphi) A_2 \cos(\omega t) = \\ = \frac{1}{2} A_1 A_2 [\sin(\Delta\varphi) + \sin(2\omega t + \Delta\varphi)] \quad (2.14)$$

Результатом множення є сума синуса різниці фаз і синуса з подвоєною частотою в порівнянні з основною частотою сигналу.

У методі синхронного детектування для перемноження використовуються два синусоїдальних або косинусоїдальних сигнали, та в результаті виходить косинус різниці фаз, що в силу парності косинуса не дозволяє відновити знак різниці. Синус - функція непарна, отже, знак різниці не втрачається.

Низькочастотна фільтрація добре проявляє себе при аналоговій обробці. Для цифрової обробки сигналу замість фільтра низьких частот застосуємо усереднення. В результаті отримаємо

$$\overline{s_1 s_2} = 0,5 A_1 A_2 \sin(\Delta\varphi) + \frac{0,5 A_1 A_2}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \sin(2\omega t + \Delta\varphi) dt \approx \\ \approx 0,5 A_1 A_2 \sin(\Delta\varphi) \quad (2.15)$$

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

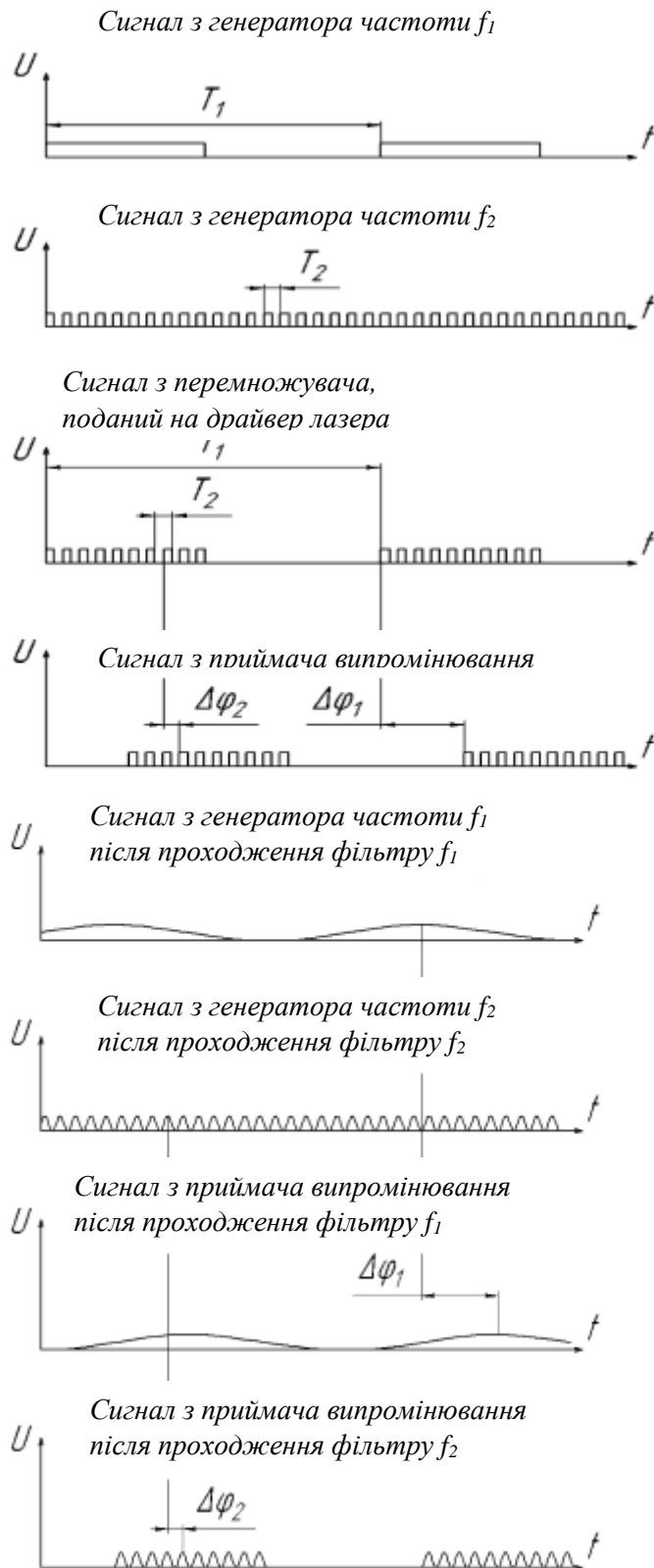


Рис. 2.4. Графіки сигналів, що пояснюють роботу лазерного фазового далекоміра

Оскільки для тимчасового інтервалу Δt , кратному T , справедливий вираз

$$\int_0^{\Delta t} \sin(2\omega t + \Delta\varphi) dt = 0$$

Результат для обчислення шуканої різниці фаз:

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(2 \frac{\overline{s_1 s_2}}{A_1 A_2}\right) \quad (2.16)$$

Це співвідношення дозволяє відновити різницю фаз зі знаком в діапазоні

$$-\frac{\pi}{2} \dots \frac{\pi}{2}$$

Як видно з формули (2.16), для обчислення фази потрібно знати амплітуди A_1 і A_2 , для чого необхідно усереднити по модулю гармонійний сигнал і помножити його на $\frac{\pi}{2}$:

$$\overline{s_{1.mod}} = \frac{A_1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |s_1| dt = \frac{A_1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |\sin(\omega t + \varphi_1)| dt$$

при $\Delta t = kT$

$$\begin{aligned} \overline{s_{1.mod}} &= \frac{A_1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |\sin(\omega t + \varphi_1)| dt \\ &\approx \frac{2A_1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin(\omega t) dt = \frac{2A_1}{T} \left(\frac{1}{\omega} \cos 0 - \frac{1}{\omega} \cos \pi \right) = \frac{2A_1}{\pi} \end{aligned}$$

Звідси,

$$A_1 = \frac{\pi \overline{s_{1.mod}}}{2} \quad (2.17)$$

Співвідношення (2.16), як і (2.17), виконується тим точніше, чим більше інтервал часу Δt в порівнянні з періодом T .

Усереднення, використане в формулах (2.16) і (2.17), дозволяє оцінювати різницю фаз навіть для сигналу з шумом, що є істотною перевагою перед іншими методами. Формула визначення різниці фаз:

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		31

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \arcsin \left(\frac{8}{\pi^2} \frac{\overline{s_{1.mod}}}{s_{1.mod} s_{2.mod}} \right) \quad (2.18)$$

Схема, що реалізує алгоритм цифрового обчислення різниці фаз між опорним і робочим коливаннями відповідно до вираження (2.18), представлена на рис. 2.5.

Для визначення значень $s_1 s_2$, $s_{1.mod}$, $s_{2.mod}$ вхідні сигнали s_1 і s_2 перемножують, потім результати цього перемноження підсумовують за n відліків і ділять на n з урахуванням частоти проходження відліків вибірки. Таким чином визначають усереднене значення.

Значення $s_1 s_2$, $s_{1.mod}$, $s_{2.mod}$ обробляють відповідно до формули (2.18). На виході системи формується сигнал, що несе інформацію про різниці фаз $\Delta\varphi$ між вхідними сигналами s_1 і s_2 .

Використання цифрових методів визначення фази дозволяє знизити частоту модуляції сигналу більш ніж на 2 порядки.

Для обробки сигналу з частотою модуляції в кілька мегагерц потрібно застосовувати гетеродування.

Гетеродином називається генератор опорної частоти, на яку потрібно знизити вимірюваний сигнал. Зазвичай метод реалізується на апаратному рівні в електронному тракті. Різницю частоти отримують шляхом перемноження вимірюваного сигналу і сигналу з гетеродина. На виході перемножителя формується низькочастотний сигнал, який після оцифровки подається в блок обробки. Сигнал з гетеродина повинен бути стабільним по частоті і фазі і точно налаштованим щодо основної частоти вимірюваного сигналу.

Прийнятий сигнал, що пройшов низькочастотну фільтрацію, являє собою синусоїдальний сигнал частоти ω з фазовим зсувом $\Delta\varphi$, а сигнал з гетеродина - косинусоїдальний сигнал частоти $(\omega - \omega_0)$ з фазовим зсувом $\Delta\varphi = 0^\circ$.

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

На рис. 2.6 представлена схема, яка пояснює процес гетеродування вимірюваного сигналу.

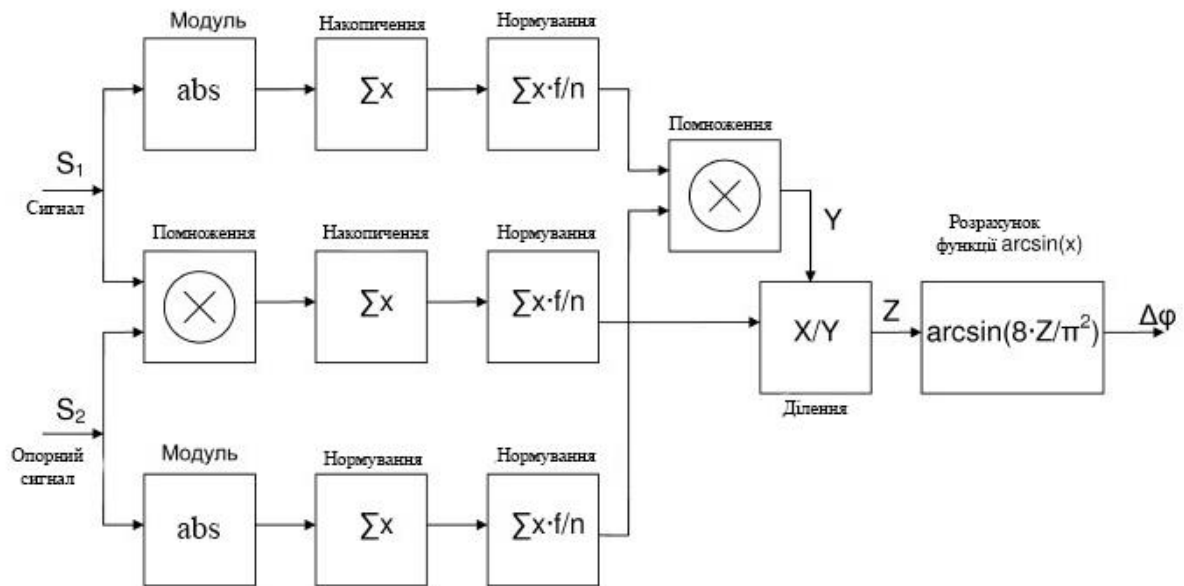


Рис. 2.5. Функціональна схема цифрового фазового детектора

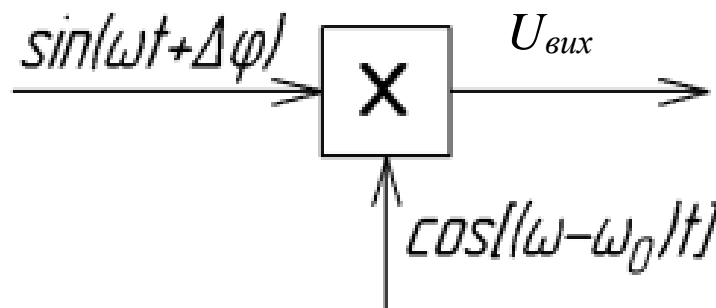


Рис. 2.6. Схема, яка пояснює процес гетеродування вимірюваного сигналу

Вихідний сигнал $U_{\text{вих}}$ знаходимо за наступним виразом

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вих}} &= U_0 \sin(\omega t + \Delta\varphi) \cos[(\omega - \omega_0)t] = \\
 &= U_0 \frac{\sin(\omega t + \Delta\varphi - (\omega - \omega_0)t) + \sin(\omega t + \Delta\varphi + (\omega - \omega_0)t)}{2} = U_0 \frac{1}{2} \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi) + \\
 &+ U_0 \frac{1}{2} \sin((2\omega - \omega_0)t + \Delta\varphi) \quad (2.19)
 \end{aligned}$$

Сигнал на виході змішувача являє собою суму двох синусоїдальних сигналів з частотами ω_0 і $(2\omega - \omega_0)$. Складова сигналу частотою $(2\omega - \omega_0)$ пригнічується низькочастотним фільтром. Сигнал на виході фільтра

$$U = \frac{1}{2} \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi) \quad (2.20)$$

Таким чином, напруга після гетеродування і низькочастотної фільтрації має значно меншу частоту при збереженні інформації про різниці фаз $\Delta\varphi$. При цьому низька частота модуляції ω_0 дозволяє продовжити подальшу обробку за допомогою звичайних цифрових процесорів.

Для зменшення похибки обчислення різниці фаз цифровим фазометром відповідно до формули (2.17) потрібно забезпечити високе відношення сигнал / шум. Розрахунки і комп'ютерне моделювання показують, що при відношенні сигнал / шум, що дорівнює 20, похибка визначення фази дорівнює $\pi \cdot 10^{-3}$, в той час як при відношенні сигнал / шум, що дорівнює 50, похибка знижується в 100 раз до значення $\pi \cdot 10^{-5}$. У зв'язку з цим доцільно здійснити попередню вузькосмугову цифрову фільтрацію оброблюваних сигналів для зменшення шумів.

Переваги цифрових фільтрів:

- 1) можливість реалізації фільтрів з будь-якими імпульсними і частотними характеристиками в межах смуги частот, що забезпечується АЦП і процесором;
- 2) відсутність негативних факторів (інерційність енергоємних елементів, вплив паразитних зв'язків між окремими вузлами, неузгодженість вузлів по вхідному опору);
- 3) повторюваність характеристик;
- 4) висока точність відтворення операторів перетворення і стабільність характеристик;

					<i>ПК71.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		34

- 5) нечутливість до змін зовнішніх умов;
- 6) висока надійність в роботі;
- 7) можливість діагностики і самодіагностики;
- 8) модернізація в процесі експлуатації;
- 9) малі габарити і маса, оскільки додаткових електронних компонентів не потрібно.

Реалізація вузькосмугового цифрового фільтра з добротністю понад 50 спрощується, якщо використовувати фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ). Передавальна функція цифрового НІХ-фільтра визначається наступним виразом:

$$y_n = \sum_{j=1}^M a_j y(n\Delta t - j\Delta t) + \sum_{i=0}^N b_i x(n\Delta t - i\Delta t) \quad (2.21)$$

де $x(n\Delta t)$ і $y(n\Delta t)$ - відліки вхідного і вихідного сигналів фільтра відповідно; a_j і b_i - коефіцієнти.

Вираз (2.21) дозволяє зробити висновок, що для обчислення вихідних відліків фільтра необхідно періодично виконувати лише три операції:

- затримку (запам'ятовування) N і M відліків відповідно вхідного і вихідного сигналів;
- множення;
- алгебраїчне додавання.

З урахуванням описаних вище особливостей побудови окремих вузлів і елементів лазерного фазового далекоміра його функціональна схема представлена на рис. 2.7.

Генератор формує напругу, мінливий за гармонійним законом на частоті модуляції F_{1M} і подається одночасно на драйвер лазера і на вхід гетеродина. В результаті випромінювання лазера модулюється на частоті F_{1M} , а на виході

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

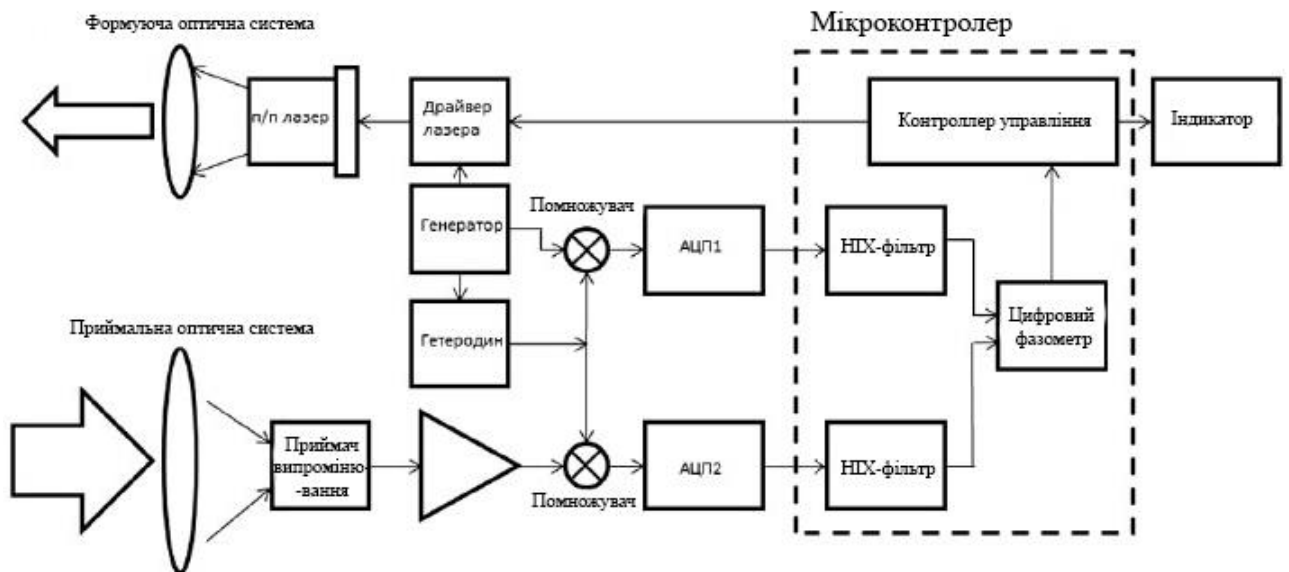


Рис. 2.7. Функціональна схема сучасного цифрового лазерного фазового далекоміра

гетеродина формується гармонійний сигнал з частотою f_0 , що відрізняється від частоти F_{1M} на 1 кГц. Після перемноження частот вихідна опорна напруга з частотою 1 кГц надходить на АЦП1 і далі в цифровий процесор.

Оцифровані сигнали в опорній і вимірювальній ланцюгах процесора проходять вузькосмугову фільтрацію в НЧ-фільтрах, після чого подаються в блок цифрового фазометра. Результат обчислення фазового зсуву надходить в контролер, який перераховує його в значення дальності, що виводиться на індикатор.

2.2. Аналітичний огляд лазерів

Газові лазери

У залежності від часток, енергетичні рівні яких використовуються для одержання інверсії, прийнято розрізняти атомарні, іонні і молекулярні лазери.

Лазери за режимом роботи:

					<i>ПК71.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

- безперервні,
- імпульсні,
- одномодові,
- багатомодові,
- одночастотні,
- інші.

За довжиною хвилі:

- ультрафіолетові,
- видимі,
- інфрачервоні.

За видом накачки:

- газорозрядні,
- фотодісоціонні,
- газодинамічні,
- хімічні.

Найбільше зручно класифікувати газові лазери по роду активного середовища. Такий розподіл визначає довжини хвиль випромінювання, що генерується, приблизну потужність, умови експлуатації, орієнтовні габарити.

По роду активного середовища:

- гелій-неонові,
- аргонові,
- криптонові,
- на азоті,
- на вуглекислому газі,
- інші.

Твердотільні лазери

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		37

Працюють в імпульсному режимі. Відомі лабораторні зразки лазерів, у яких досягається порівняно велика потужність (до 10 Вт) у безперервному режимі.

Загальною характеристикою твердотільних лазерів є (у порівнянні з газовими):

- набагато більша потужність в імпульсі,
- менший ступінь когерентності випромінювання,
- великі габарити і маса.

Напівпровідникові лазери

Невелика споживана потужність, можливість здійснення модуляції струмом накачування. В даний час промисловість випускає напівпровідникові лазери з активним елементом на арсеніді галію, накачування якого проводиться за допомогою інжекції носіїв струму через *p-n*-перехід чи електронів.

Вибір лазера для конкретного застосування обумовлюється вимогами, що пред'являються до приладу: дальністю дії, умовами роботи (навколишня температура, вібрація, тиск) терміном служби і т.д..

Типи лазера	Переваги	Недоліки
Газові	Тривала робота в безперервному режимі при кімнатній температурі; високий ступінь монохроматичності, відтворюваності і стабільності частоти; мала чутливість до змін температури навколишнього	Відносно невелика потужність і ККД. (за винятком лазера на CO ₂) у порівнянні з твердотільними лазерами, що працюють в імпульсному режимі; великі габарити і маса в порівнянні з

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		38

	середовища; мала розбіжність	напівпровідниковими лазерами
Твердотільні	Одержання дуже коротких і потужних імпульсів випромінювання, великої енергії в імпульсі; використання сонячного накачування	Великі габарити і маса; високе значення граничної енергії накачування; порівняно невисока частота повторення імпульсів; необхідність охолодження при роботі в безупинному режимі; розкид параметрів від імпульсу до імпульсу
Напівпровідникові	Малі габарити і вага; невелика потужність накачування і величина живильної напруги; висока частота повторення імпульсів; ККД.; простота здійснення модуляції; робота без охолодження (в імпульсному режимі)	Велика розбіжність пучка; невисокий ступінь тимчасової і просторової когерентності; залежність параметрів випромінювання від температури зовнішнього середовища; порівняно широкий діапазон спектра випромінювання

Таблиця 1. Характеристики різних типів лазерів

Для цього проекту я віддав перевагу напівпровідниковому типу лазера оскільки він досить простий та має невеликі габарити що задовольняє поставлену задачу. Але він має досить високу розбіжність пучка випромінювання, яка буде вирішена використанням коліматора з передаючим об'єктивом, які утворює телескопічну систему типу труби Галілея.

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		39

2.3. Фізико-математична модель приладу

Розглянемо порядок розрахунку дальності дії далекоміру при відсутності фону. Загальний вираз для величини потоку випромінювання на вході приймача випромінювання має наступний вигляд:

$$\Phi_{\text{пр}} = \Phi * \tau_{\text{пер}} * \tau_a^2 * \tau_{\text{вх зр}} * \rho * \tau_{\text{пр}}, \text{ де} \quad (2.22)$$

$\Phi_{\text{пр}}$ – потік, який потрапляє на вхідну зіницю прийомної оптичної системи ;

$\tau_{\text{пер}}$ – коефіцієнт пропускання передаючої оптичної системи;

τ_a – коефіцієнт пропускання атмосфери (в одному напрямку);

$\tau_{\text{об}}$ -- ефективна відбиваюча поверхня об'єкта, до якого вимірюється дальність;

$\tau_{\text{вх зр}}$ – коефіцієнт зрізування потоку на вхідній зіниці прийомної системи;

$\tau_{\text{пр}}$ – коефіцієнт пропускання прийомної оптичної системи.

Для надійного виявлення відбитого об'єктом потоку необхідно, щоб

$$\Phi_{\text{пр}} \geq q \Phi_{\text{п}}, \quad (2.23)$$

де q – потрібне відношення сигнал/шум;

$\Phi_{\text{п}}$ – порогова чутливість приймача.

Підставляючи в цю формулу $\Phi_{\text{п}}$ і виражаючи $\Phi_{\text{пр}}$ через відстань від передавача до об'єкту L , знаходимо шукану величину L .

Звідси слідує, що $\tau_{\text{пер}}$ і $\tau_{\text{пр}}$ не залежать від відстані, τ_a в першому наближенні можливо прийняти за одиницю. Тоді можна отримати вираз для дальності дії, виражаючи через L величини ρ і $\tau_{\text{вх зр}}$.

Розглянемо випадок коли розподілення в лазерному пучку рівномірне (приблизно як у випадку багатомодового випромінювання), а об'єкт являє

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

собою плоску дифузну поверхню. В цьому випадку ефективна відбиваюча поверхня об'єкта дорівнює:

$$\tau_{\text{пр}} = \Phi'_{\text{об}} / \Phi_{\text{об}} = (S_{\text{об}} / S) \rho_{\text{об}} \cos \beta,$$

де $\Phi'_{\text{об}}$ та $\Phi_{\text{об}}$ – потік, відбитий об'єктом, і потік, який пройшов через перетин пучка з площею S ; $S_{\text{об}}$ і S – площа об'єкта і площа перетину пучка, перпендикулярного до напрямку променя, в площині об'єкта; β – кут між напрямком падаючого променя і нормаллю до випромінюваної поверхні, також відноситься до відбитого променя і прийомної апертури. При дифузному відбитті об'єкт можна представити як випромінювач, який має енергетичну яскравість $L_e = M_e / \pi$, де $M_e = \Phi'_{\text{об}} / S_{\text{об}}$. Тоді потік, який попадає на вхідну зіницю прийомної системи, буде дорівнювати:

$$\Phi_{\text{вх}} = \frac{\Phi_0}{\pi S} S_{\text{вх}} \frac{S_0}{L^2} \cos^2 \beta \tau_c \rho_0$$

Коефіцієнт зрізання на вхідній зіниці можна подати в наступному вигляді:

$$\tau_{\text{вх зр}} = \Phi_{\text{вх зр}} / \Phi'_{\text{об}} \tau_a = (S_{\text{вх зр}} / \pi L^2) \cos \beta.$$

Таким чином,

$$\tau_{\text{об}} \tau_{\text{вх зр}} = (S_{\text{об}} S_{\text{вх зр}} / \pi S L^2) \beta_{\text{об}} \cos^2 \beta.$$

Якщо відстань від передатчика до об'єкту більше еквівалентного конфокального параметру пучка, який виходить з передаючої оптичної системи $Re_{\text{пер}}$, то величину S можна вирахувати як $S = \omega_{\text{пер}} L^2$, де $\omega_{\text{пер}}$ – тілесний кут пучка передатчика.

Враховуючи, що $\Phi_{\text{об}} = \Phi \tau_{\text{пер}} \tau_a$, а $\Phi_{\text{пр}} = \Phi_{\text{вх зр}} \tau_{\text{пр}}$, то потік на вході приймача дорівнює

$$\Phi_{\text{пр}} = (\Phi S_{\text{об}} S_{\text{вх зр}} / \pi \omega_{\text{пер}} L^2) \tau_{\text{пер}} \tau_a^2 \rho_{\text{об}} \tau_{\text{пр}} \cos^2 \beta. \quad (2.24)$$

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Ця формула показує, що випромінювання лазера послаблюється пропорційно четвертій степені відстані до об'єкту. Вирішуючи разом (2.23) і (2.24), отримуємо формулу для розрахунку дальності дії далекоміру

$$L = (\Phi S_{об} S_{вх зр} \tau_{пер} \tau_a^2 \rho_{об} \tau_{пр} \cos^2 \beta / q \Phi_{п} \pi \omega_{пер})^{1/4} \quad (2.25)$$

Формула (2.25) справедлива в тому випадку, коли розбіжність пучка, який виходить з передатчика, більше кутового розміру об'єкта, то $\tau_{об} = \rho_{об}$, а $\tau_{вх зр} = (S_{вх зр} / \pi L^2) * \cos \beta$. Таким чином,

$$\Phi_{пр} = \Phi (S_{вх зр} / \pi L^2) \tau_{пер} \tau_a^2 \rho_{об} \tau_{пр} \cos \beta. \quad (2.26)$$

Дальність дії в цьому випадку буде дорівнювати:

$$L = \sqrt{\frac{\Phi S_{об} S_{вх} \tau_{пер} \tau_a^2 \tau_{пр} \rho_{об} \cos^2 \beta}{q \Phi_{п} \pi S}} \quad (2.27)$$

Розрахунки по формулам (2.25) та (2.27) відразу дають значення L тільки при $\tau_a = 1$. В іншому випадку безпосередньо розрахувати L неможливо, так як τ_a само залежить від L . Тоді значення L при $\tau_a = 1$ можна прийняти за вихідну величину, а потім, задаючи деяким меншим значенням L і розраховуючи відповідне τ_a , в кінці знаходять L , яке відповідає формулі (2.25) або (2.27).

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		42

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1. Габаритний розрахунок приладу

В даному приладі джерелом випромінювання є напівпровідниковий лазер, який має досить високу розбіжність пучка випромінювання. Для вирішення цієї проблеми застосовують коліматори, які зменшують кутову розбіжність приблизно в Γ раз (Γ – збільшення колімаційної системи). Для цього потрібно коліматор зробити в вигляді від’ємного компонента, який разом з передаючим об’єктивом утворює телескопічну систему типу труби Галілея. При цьому повздовжні габарити передаючої оптичної системи зменшуються.

Розрахунок параметрів колімаційної системи:

Знайдемо розмір першої перетяжки:

$$w_{01} = \frac{\lambda}{\pi\theta_{\text{перп}}} = 6,98 * 10^{-7} \text{ м} \quad w_{01} = \frac{\lambda}{\pi\theta_{\text{пар}}} = 2,44 * 10^{-6}$$

Конфокальний параметр пучка перед першим компонентом :

$$R_{e01} = \frac{2\lambda}{\pi(\theta_{\text{перп}}^2)} = 4,57 * 10^{-6} \text{ м} \quad R_{e01} = \frac{2\lambda}{\pi(\theta_{\text{перп}}^2)} = 0.000056 \text{ м}$$

Для розрахунків візьмемо телескопічну систему з такими параметрами:

$$f_0 = -40 \text{ мм} \quad d_0 = 15 \text{ мм} \quad f_1 = 50 \text{ мм}$$

f_0 – фокусна відстань першого (від’ємного компонента)

d_0 – відстань між компонентами

f_1 – фокусна відстань другого (додатного компонента)

За першим компонентом конфокальний параметр буде таким:

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$R'_{e01} = \frac{R_{e01}}{\left(1 + \frac{d_0}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{R_{e01}}{2f_0}\right)^2} = 2,41 * 10^{-6} \text{ м}$$

$$R'_{e02} = \frac{R_{e02}}{\left(1 + \frac{d_0}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{R_{e02}}{2f_0}\right)^2} = 0,00003 \text{ м}$$

Розмір перетяжки за першим компонентом знаходиться за формулою:

$$w'_{01} = \sqrt{\frac{\lambda R'_{e01}}{2\pi}} = 5,07 * 10^{-7}$$

$$w'_{02} = \sqrt{\frac{\lambda R'_{e02}}{2\pi}} = 1,78 * 10^{-6}$$

Конфокальний параметр і розмір перетяжки після другого компонента:

$$R'_{e1} = R'_{e01} \left[\left(\frac{R'_{e01}}{2f_1} \right)^2 \right]^{-1} = 4135,05 \text{ м}$$

$$R'_{e2} = R'_{e02} \left[\left(\frac{R'_{e02}}{2f_1} \right)^2 \right]^{-1} = 337,55 \text{ м}$$

$$w'_{1} = \sqrt{\frac{\lambda R'_{e1}}{2\pi}} = 0,021 \text{ м}$$

$$w'_{2} = \sqrt{\frac{\lambda R'_{e2}}{2\pi}} = 0,006 \text{ м}$$

Знайдемо розбіжність пучка на виході:

$$\theta'_{\text{перп}} = \frac{w_{01}}{w'_{1}} = 0,000033$$

$$\theta'_{\text{пар}} = \frac{w_{02}}{w'_{2}} = 0,000116$$

Діаметр лазерної плями на 10 метрах буде:

$$z_{k1} = \frac{2\pi w'_{1}{}^2}{\lambda} = 4135,05 \text{ м}$$

$$z_{k2} = \frac{2\pi w'_{2}{}^2}{\lambda} = 337,55 \text{ м}$$

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		44

$$w_{z1} = w'_1 \sqrt{0,23 + \left(\frac{2z_1}{z_{k1}}\right)^2} = 10,07 \text{ м}$$

$$w_{z2} = w'_2 \sqrt{0,23 + \left(\frac{2z_1}{z_{k2}}\right)^2} = 2,88 \text{ м}$$

Розрахунок параметрів приймальної оптичної системи:

Розрахуємо параметри приймального об'єктиву. Представимо об'єктив у вигляді головних поверхонь його компонентів (див. рис. 3.1) та задамося фокусною відстанню об'єктива – 100 мм.

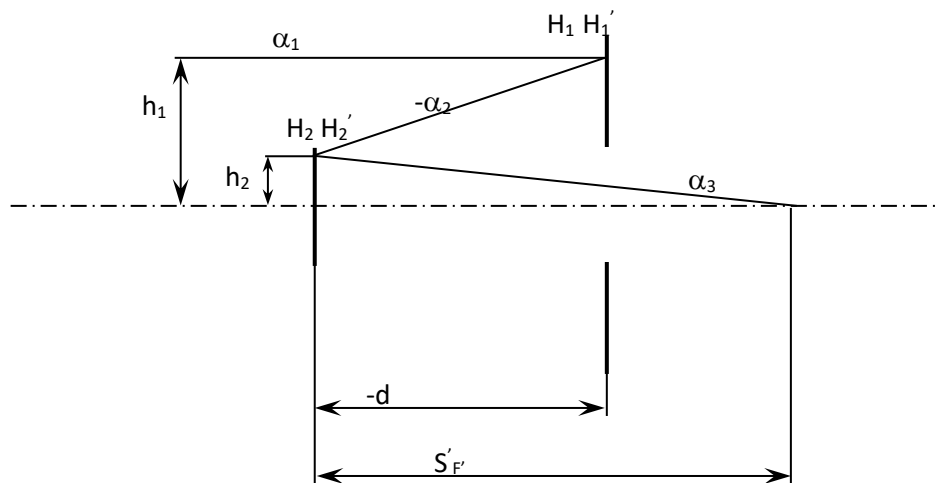


Рис. 3.1. Об'єктив приймальної оптичної системи далекоміра

У системі присутня центральне екранування. Звичайно прагнуть до того, щоб воно не перевищувало 30%. В нашому випадку необхідно звести до мінімуму екранування пучка випромінювання центральним дзеркалом, тому можна задатися наступними умовами:

$$\frac{D_2}{D_1} = 0,1 \quad \frac{h_2}{h_1} = 0,1$$

де D_1 і D_2 діаметри першого і другого дзеркал відповідно.

Також задамося відношенням:

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		45

$$\frac{S_F}{-d} = 1,3$$

Метою габаритного розрахунку є знаходження оптичної сили кожного з компонентів, відстаней між ними, знаходження відрізків, що вказують положення вхідної зіниці, а також діаметрів апертурної і польової діафрагм і зіниць.

Визначимо фокусні відстані першого і другого дзеркал.

Дзеркала є одноповерхневими компонентами, тому спочатку розраховуються їхні радіуси по формулі:

$$r_k = \frac{n_{k-1} - n_k}{n_{k+1}a_{k+1} - n_k h_k}$$

А потім визначаються їхні фокусні відстані по формулі:

$$f'_k = \frac{r_k}{2}$$

Для визначення радіусів і фокусних відстаней необхідно знати кути і висоти першого допоміжного нульового променя (ДНП).

Умовою нормування 1-го ДНП є $\alpha_{p+1} = 1$. У нашому випадку $\alpha_{p+1} = \alpha_3$.

Предмет знаходиться на нескінченності, тому

$$\alpha_1 = 0, \quad h_1 = f' = 100 \text{ мм.}$$

де f' – фокусна відстань об'єктива.

З рисунка видно що, $\frac{h_2}{S_F} = a_3 = 1$ тоді $S_F = h_2$.

З вихідних даних відомо, що $\frac{h_2}{h_1} = 0.1$ тоді:

$$h_2 = 0.1h_1 = 0,02 \text{ м}$$

З вихідних даних відомо, що $\frac{S_F}{-d} = 1,3$ тоді:

$$d = \frac{h_2}{-1,3} = -0,046 \text{ м}$$

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

З малюнка видно, що $-a_2 = \frac{h_1 - h_2}{-d}$, тоді:

$$a_2 = \frac{h_2 - h_1}{-d} = -3,033$$

Після визначення параметрів 1-го ДНП визначимо радіуси і фокусні відстані дзеркал.

Радіус першого дзеркала дорівнює:

$$R_1 = \frac{n_2 - n_1}{n_2 a_2 - n_1 a_1} h_1 = -131,868 \text{ мм}$$

Фокусна відстань першого дзеркала дорівнює:

$$f'_1 = \frac{R_1}{2} = -65,934 \text{ мм}$$

Радіус другого дзеркала дорівнює:

$$R_2 = \frac{n_3 - n_2}{n_3 a_3 - n_2 a_2} h_2 = -59,016 \text{ мм}$$

Фокусна відстань другого дзеркала дорівнює:

$$f'_2 = \frac{R_2}{2} = -29,508 \text{ мм}$$

Визначимо діаметр вхідної зіниці:

Очевидно, що вхідна зіниця буде збігатися з поверхнею першого дзеркала, тому $D_{\text{вх зр}} = 30 \text{ мм}$.

Тоді $D_{\text{вих зр}} = D_{\text{вх зр}} * 0,1 = 3 \text{ мм}$.

Світлові діаметри компонентів будуть рівні:

- ◆ першого дзеркала $D_1 = 30 \text{ мм}$;
- ◆ другого дзеркала $D_2 = 3 \text{ мм}$.

З огляду на припуски на кріплення, одержимо повні діаметри компонентів:

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

- ◆ першого дзеркала $D_1 = 34$ мм;
- ◆ повний діаметр другого дзеркала збігається з його світловим діаметром.

Діаметр апертурної діафрагми буде дорівнює світловому діаметру першого дзеркала:

$$D_{a.d.} = D_{дз} = 30 \text{ мм}$$

3.2. Енергетичний розрахунок приладу

Енергетичний розрахунок полягає у знаходженні потоку, який потрапляє на чутливу область фотоприймача. На шляху від джерела випромінювання до фотодіода потік зазнає втрат при проходженні оптичних матеріалів, поглинається та розсіюється атмосферою. Найбільші втрати спостерігаються при відбиванні від об'єкта, оскільки останній, частіше за все має дифузну поверхню.

Розрахуємо втрати при проходженні випромінювання через атмосферу:

Переважає більшість втрат в атмосфері – молекулярне поглинання випромінювання газовими складовими повітря та розсіювання на частинках, що містяться в атмосфері.

$$\tau_{ат} = \tau_{мп} * \tau_{розс}$$

$\tau_{мп}$ – коефіцієнт молекулярного поглинання;

$\tau_{розс}$ – коефіцієнт розсіювання.

Молекулярне поглинання складається з поглинання парами води та вуглекислим газом.

$$\tau_{м} = \tau_{H_2O} * \tau_{CO_2}$$

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Поглинання парами води, що містяться в атмосфері, зумовлено такими факторами:

а) числом молекул що поглинають, воно залежить від параксіального тиску парів води та від відстані D , котру проходить випромінювання у поглинаючому середовищі. Цей фактор часто характеризують товщиною шару води, осадженої на трасі довжиною D . Ця величина визначається як висота циліндра h перерізом S із об'ємом, що дорівнює об'єму рідини, отриманої в результаті конденсації парів води, що містяться в об'ємі атмосфери, обмеженої циліндром з площею основи S та висотою D .

б) природою молекулярних переходів, відповідальних за селективні спектри поглинання;

в) температурою та повним тиском суміші газів, котрі визначають ширину спектральних ліній за рахунок зіткнень молекул та за рахунок ефекту Доплера.

Розрахунки по емпіричним формулам коефіцієнта пропускання $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$ для вибраного спектрального діапазону в функції товщини шару осадженої води h для даної траси проводились кількома дослідниками. Ми користуємось тут результатами отриманими Пассманом та Лармором в 1956 році.

Коефіцієнт τ_{CO_2}

Концентрація вуглекислого газу в атмосфері залежить тільки від тиску; на нульовій висоті можна вважати постійною. Отже, коефіцієнт пропускання вуглекислого газу τ_{CO_2} залежить лише від відстані, що проходить випромінювання. У таблицях Пассмана –Лармора наведені значення τ_{CO_2} для горизонтальної траси на рівні моря.

Отже вирахуємо коефіцієнт пропускання атмосфери, зумовлений молекулярним поглинанням.

Розглянемо умови, в яких працюватиме розроблюваний прилад:

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

За умовами технічного завдання дальність вимірювань – 100 м, діапазон температур +50 .. -50 °С, довжина хвилі випромінювача $\lambda = 0,67$ мкм.

За кривою залежності товщини шару осажденої води від температури отримуємо:

$h' = 30$ мм/км для температури 30°С та $h' = 3$ мм/км - для температури -10°С.

З таблиць Пасмана- Лармора маємо:

для $\lambda = 0,67$ мкм та $h' = 30$ мм/км $h' = 3$ мм/км дають $\tau_{H_2O} = 0,256$ та $\tau_{H_2O} = 0,645$ відповідно. Для відстані $D = 0.1$ км $\tau_{CO_2} = 1$, звідки

$$\tau_M = \tau_{CO_2} * \tau_{H_2O} = 0,256 \quad \text{для} \quad h' = 21 \text{ мм/км}$$

$$\tau_M = \tau_{CO_2} * \tau_{H_2O} = 0,645 \quad \text{для} \quad h' = 2 \text{ мм/км}$$

Розсіювання на частинках:

Розсіювання на частинках, що містяться в атмосфері, викликає послаблення випромінювання. Частинки - краплинки води, можна вважати сферичними. У відповідності з розмірами можна виділити частинки двох типів.

Аерозолі: дуже маленькі частинки, зрівноважені в атмосфері.

Димка: причиною виникнення димки являються мікроскопічні (0,5 мкм) пилинки, на котрих у вологій атмосфері концентруються молекули води, і тому вони можуть збільшуватись у розмірі (біля моря частинки солі досить гігроскопічні, і є часто причиною густої димки).

Туман: коли частинки, що викликають димку, збільшуються в розмірах і перетворюються в краплинки води або в кристалики льоду, димка стає туманом (розміри частинок близько декількох мікрометрів). Хмари мають таку ж структуру і на відміну від туману формуються на висоті.

Атмосферні опади: краплі води мають розміри близько 0,25 мм і вже не втримуються в повітрі, випадаючи у вигляді дощу.

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		50

Розрахунок коефіцієнта τ_p

Пропускання атмосфери, що визначається явищем розсіювання, розраховується на основі розгляду атмосферного шару d_D . Зменшення сили випромінювання в результаті його проходження через шар середовища товщиною d_D :

$$dI = -\gamma I d_D,$$

де γ – коефіцієнт розсіювання, I – сила випромінювання, що падає на шар.

Це співвідношення можна записати у вигляді:

$$dI/I = -\gamma d_D,$$

Воно дає при інтегруванні закон зміни сили випромінювання при проходженні середовища довжиною D .

$$\int dI = -dI = -\gamma_D + C, \text{ звідки}$$

$$I = C e^{-\gamma_D}$$

Стала C розраховується із умови $I = I_0$ при $D = 0$ звідки $I = I_0 e^{-\gamma_D}$
Коефіцієнт пропускання, що визначається явищем розсіювання, дорівнює

$$\tau_p = \frac{I}{I_0} = e^{-\gamma_D}$$

3.3. Розрахунок потоку, що потрапляє на фотоприймач

Характеристики джерела випромінювання: $\Phi = 250$ мВт. Величина потоку, який попаде на фотоприймач в загальному випадку має вигляд:

$$\Phi_{\text{пр}} = m_M \Phi_1 \tau_{\text{опт}} \tau_a^2 \rho_{\text{об}} \Omega_1$$

$\Phi_{\text{пр}}$ – потік, що попадає на фотоприймач;

m_M – коефіцієнт модуляції модулятора;

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Φ_1 – потік від джерела випромінювання;

$\tau_{\text{опт}}$ – коефіцієнт пропускання оптики;

τ_a – коефіцієнт пропускання атмосфери в одному напрямку;

$\rho_{\text{об}}$ – коефіцієнт відбиття об'єкта;

Ω_1 – тілесний кут, що опирається на площу робочої зони фотоприймача.

Розрахунок потоку на еталонному фотодіоді

Коефіцієнт втрат при проходженні плоско-паралельної пластинки знайдемо за допомогою формули Френеля:

$$\varepsilon_1 = 45 \frac{\pi}{180} \quad \varepsilon_2 = a \sin \left(\frac{\sin(\varepsilon_1)}{1,5163} \right) = 0,485$$

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2}{\tan(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} + \frac{\sin(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} \right) = 0,054$$

$$\tau = 1 - \rho = 0,9475$$

$$\Phi_1 = \Phi_d \rho m_{\text{мод}} \tau_{\text{зер}} = 7,15 \text{ мВт}$$

Розрахунок потоку на другому фотодіоді

$$\Phi_2 = \Phi_d \tau m_{\text{мод}} \tau_{\text{атм}}^2 \rho_{\text{ц}}$$

$A_{\text{фд}}$ – ефективна площа фотодіода;

L – відстань до об'єкту;

$\rho_{\text{ц}}$ – коефіцієнт відбиття від об'єкту;

$$\rho_{\text{ц}} = \frac{0,7}{2\pi} \Omega_2$$

$$\Omega_2 = \frac{A_{\text{фд}}}{L^2}$$

$$\Phi_2 = 2,3851 * 10^{-14}$$

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Отриманий на другому фотодіоді потік занадто малий для його надійного виявлення фотодіодом (порогів потік фотоприймача $\Phi_{\text{пор}} = 3,6 * 10^{-15}$ Вт). В цьому випадку для підсилення сигналу використаємо приймальну оптичну систему. За рахунок оптичної системи ми можемо підсилити рівень корисного сигналу в $K_{\text{опт}}$ разів.

$$K_{\text{опт}} = \frac{A_{\text{дз}}}{A_{\text{фд}}} = 2044,84$$

$A_{\text{дз}} = 30 \text{ mm}^2$ – площа дзеркальної прийомної системи;

$A_{\text{фд}} = 0,28 \text{ mm}^2$ – площа фотодіода;

За рахунок внесення в конструкцію дзеркальної системи ми отримали нове значення корисного потоку, рівне:

$$\Phi_2 = 5,5456 * 10^{-9}$$

3.4. Розрахунок відношення «сигнал/шум» на виході фотодіода

Для розрахунку відношення «с/ш» виберемо приймач випромінювання S6432, характеристики якого наведені нижче:

- чутливість: $S = 0.48 \text{ А/Вт}$ при $\lambda = 0.66 \text{ мкм}$
- темновий струм: $I_D = 0.01 \text{ нА}$
- ємність: $C_t = 3 \text{ пФ}$
- пороговий потік $\Phi_{\text{п}} = 3,16 * 10^{-15} \text{ Вт}$
- робоча напруга: $V = 20 \text{ В}$
- постійна часу: $\tau = 3,2 * 10^{-11} \text{ с}$

Виберемо фотогальванічний режим включення фотодіода, тому що в цьому режимі відсутнє джерело живлення, істотно менші шуми (більше відношення сигнал/шум), малий внутрішній опір, але потрібна особлива

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

вимога до підсилювача - він повинен мати великий коефіцієнт підсилення й малий рівень шуму. Схема включення, що задовольняє цю вимогу, наведена на малюнку нижче:

Оскільки в документації на приймач всі характеристики приведені для еталонного джерела випромінювання, то необхідно виконати перерахунок інтегральної чутливості фотоприймача для реального випромінювача.

Формула для перерахунку інтегральної чутливості із енергетичних величин в енергетичні для різних джерел випромінювання має вигляд:

$$S_e^p = S_e^{em} \frac{\xi^p}{\xi^{em}}$$

де ξ – коефіцієнт використання потоку приймачем випромінювання. Він показує яку долю в загальному потоці, який падає на ПВ займає корисний потік для даного ПВ. Він визначається за формулою:

$$\xi = \frac{\int_0^\infty \dot{\Phi}(\lambda) \dot{S}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \dot{\Phi}(\lambda) d\lambda}$$

де $\dot{S}(\lambda)$ – функція відносної спектральної чутливості приймача.

При використанні монохроматичного (лазерного) випромінювача перерахунок чутливості суттєво спрощується, оскільки при постійній довжині хвилі чутливість можна рахувати константою.

Коефіцієнт еталонного джерела визначається за формулою:

$$\xi^{em} = \varepsilon(\lambda) \frac{\dot{M}(\lambda) \dot{S}(\lambda) d\lambda}{\sum \dot{S}(\lambda) \sum \dot{M}(\lambda) \varepsilon(\lambda)}$$

Оскільки довжина хвилі постійна то коефіцієнт буде дуже близький до одиниці = 1.

Розрахувавши всі значення для знаходження реальної інтегральної чутливості отримаємо:

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

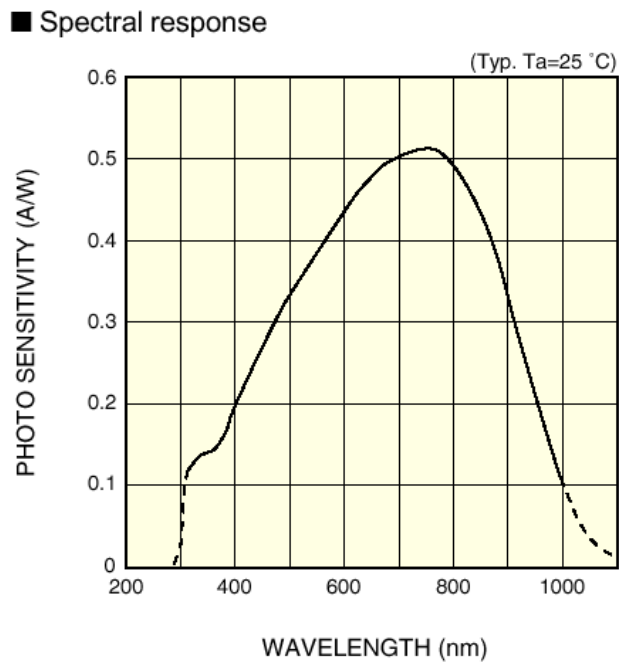


Рис. 3.2. Графік спектральної чутливості приймача

$$S_{e.етаон} = 0,48 \frac{A}{W}$$

$$S_{e.реальн} = S_{e.етаон} \frac{\xi_p}{\xi_{еталон}} \quad S_{e.реальн} = 0,432 \frac{A}{W}$$

Виходячи із заданих параметрів, розрахуємо корисний сигнал, що одержуємо на виході фотодіода:

$$I = \Phi S$$

Де I – корисний сигнал на виході записаний в абсолютних величинах, А.

Сигнал на виході із приймача:

$$I = 3,663 * 10^{-9}$$

Повна напруга шуму на виході фотодіода визначається наступним чином :

де $e_{ш.у.}$ – спектральна густина напруги шуму підсилювача;

$i_{шфд}$ - спектральна густина шумового току фотодіода;

$i_{ш}$ – спектральна густина шумового току підсилювача;

$i_{R_{зз}}$ – спектральна густина шумового току зворотного зв'язку;

K_U - коефіцієнт підсилення по току.

Густина шумового току фотодіода, який працює в фотогальванічному режимі

$$i_{шфд} = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R_d}}$$

де k – постійна Больцмана;

T – температура р-п переходу;

R_d – темновий опір фотодіода.

Густина шумового току опору в ланцюзі зворотного зв'язку:

$$i_{R_{зз}} = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R_{зз}}}$$

При використанні операційного підсилювача з малим значенням шумів визначну роль грають шуми фотодіода та резистора зворотного зв'язку. Тому можна записати:

$$U_{ш.вих} = K_U \sqrt{i_{ш.фд}^2 R_H}$$

де $I_{шф} = 0,1 * 10^{-9}$ А.

Відношення «сигнал/шум» $\mu = 26,619$

Граничний потік який може зафіксувати фотодіод дорівнює:

$$\Phi_{п} = \frac{I_{шф}}{S}$$

де S – чутливість фотоприймача на довжині хвилі 0,67 мкм.

Тоді:

$$\Phi_{п} = 3,083 * 10^{-10} \text{ Вт}$$

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

3.5. Розрахунок похибок фазометра

Найбільший вплив будуть мати похибка квантування та амплітудно-фазова похибка.

Похибка квантування

Ця похибка виникає внаслідок того, що сигнали з генератора імпульсів та сигналів з тригера, що є перетворювачем напруги в короткі імпульси не синхронізовані. В результаті чого може виникнути ситуація, що на будь-якому з циклів вимірювання при проходженні через ключ одного чи двох імпульсів вони можуть не потрапити до лічильника. Це призводить до того, що результат, який буде виводитися на лічильник, буде недостовірним. Дана

похибка визначається за формулою $\gamma = \frac{100\%}{N_x}$.

1. Для $\varphi = 1$

$$\tau = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\varphi}{2\pi f} = \frac{1}{2\pi \times 10^3}$$

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{2\pi * 10^2 f}$$

$$N_x = \frac{\tau}{T_0} = \frac{2\pi * 10^2 f \varphi}{2\pi f} = 100\varphi = 100$$

$$\gamma = \frac{100\%}{N_x} = \frac{100\%}{100} = 1\%$$

2. Для $\varphi = 360$

$$\tau = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\varphi}{2\pi f} = \frac{360}{2\pi \times 10^3}$$

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{2\pi * 10^2 f}$$

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$N_x = \frac{\tau}{T_0} = \frac{2\pi * 10^2 f \varphi}{2\pi f} = 100\varphi = 36000$$

$$\gamma_{\text{КВ}} = \frac{100\%}{N_x} = \frac{100\%}{36000} = 0,0028\%$$

Амплітудно-фазова похибка формувача

Будь-який формувач в зоні нуль-переходу має свою кінцеву чутливість $U_{\text{сн}} = U_m \cdot \sin \omega \cdot \Delta t = 0,009$ В. З інтервалу часу Δt знайдемо похибку часового інтервалу [4].

$$\Delta t = \frac{1}{\omega} * \frac{U_{\text{сн}}}{K * U_m} = \frac{1}{2\pi * 10^3} * \frac{0,009}{50 * 10} = 2,8 * 10^{-9} \text{ с}$$

При сигналах з однаковою формою та частотою Δt на двох формувачах скомпенсуються.

Задамося інструментальними похибками головних вузлів:

$$\gamma_{\phi} = 0,01\%$$

$$\gamma_{\text{ГКІ}} = 0,00001\%$$

$$\gamma_{\text{ключа}} = 0,01 \%$$

Розрахуємо середньоквадратичне відхилення для найгіршого випадку:

$$\sigma = \sqrt{\gamma_{\text{КВ}}^2 + \gamma_{\phi}^2 + \gamma_{\text{ГКІ}}^2 + \gamma_{\text{КЛ}}^2} = \sqrt{1^2 + 0,01^2 + 0,00001^2 + 0,01^2} = 1\%$$

3.6. Розрахунок похибки вимірювання

Похибка вимірювання відстані в фазових далекомірах знаходиться за формулою:

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$\Delta D = \frac{v}{4\pi f_M} \delta_\varphi$$

v – швидкість розповсюдження світла у середовищі;

f_M – частота модуляції випромінювання;

δ_φ – похибка вимірювання фази.

$$\Delta D = 1,592 * 10^{-4} \text{ мм}$$

3.7. Розрахунок елементів Т-подібного мосту

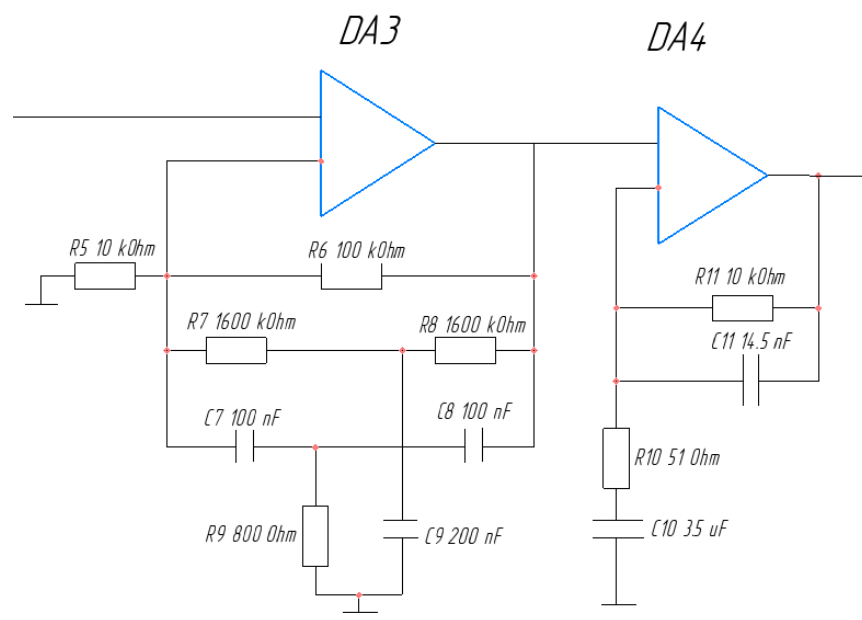


Рис. 3.3. Схема селективного підсилювача

У запропонованій схемі далекоміра основне посилення відбитого вимірювального сигналу відбувається на низьких частотах після частотного змішувача. Для того, щоб забезпечити коефіцієнт посилення по напрузі $K_U = 10^4$ і зменшити рівень шумів на частоті 1 кГц було вирішено скористатися схемою Т-образного моста. Розрахуємо параметри Т-образного моста. Так як необхідно отримати коефіцієнт посилення по напрузі $K_U = 10^4$, пропонується використовувати схему, яка складається з двох каскадів. Так як коефіцієнт посилення по напрузі всієї схеми буде визначатися добутком коефіцієнтів

підсилення по напрузі каскадів, що входять в схему, то встановимо коефіцієнт підсилення кожного каскаду $K_U = 100$

Відомо, що:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

При $f_0 = 1$ кГц :

$$\frac{1}{RC} = 6280 \frac{1}{\text{Ом} * \Phi}$$

Нехай $C = C7 = C8 = 100$ нФ, тоді:

$$R = \frac{1}{C * 6280} = \frac{1}{100 * 10^{-9} * 6280} = 1592,4 \text{ Ом}$$

Для опору і ємностей моста справедливі співвідношення: $R = R7 = R8 = 1592,4 \text{ Ом}$.

					<i>ПК71.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

РОЗРОБКА І ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИЛАДУ

При конструюванні приладу необхідно дотримуватись наступних рекомендацій:

1) конструкція повинна складатися з вузлів в залежності від функціонального призначення;

2) складальні одиниці та блоки приладу по можливості повинні бути закінчені з точки зору виробництва, не потребувати додаткової обробки, повинні дозволяти додаткову перевірку або контроль;

3) конструкція повинна забезпечувати можливість складання як окремих вузлів, так і конструкції в цілому;

4) кількість деталей, що входять у зборку, повинна бути по можливості мінімальною;

5) елементи та блоки необхідно встановлювати так, щоб вони не перешкоджали ходу променів;

6) при монтажі в загальному корпусі окремі вузли та блоки під час роботи не повинні заважати один одному;

7) в умовах експлуатації приладу необхідно передбачити можливість швидкої заміни вузлів чи блоку;

8) необхідно, по можливості, максимально стандартизувати деталі.

Конструкція розробленого приладу складається з блоків та вузлів, які закріплені в загальному корпусі 6, який з метою зменшення маси зроблений з пластмаси. Ці вузли, зокрема, блок випромінювача 1; блок передавальної оптики 3; канал прийому еталонного сигналу, що включає в себе пластмасовий корпус в якому закріплене дзеркало та лінза для фокусування пучка на приймач, і, безпосередньо, сам приймач; блок прийому

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

вимірюваного сигналу – який складається з дзеркальної системи Кассегрена, та приймача випромінювання; електронний блок для обробки сигналів.

Корпус має форму паралелепіпеда, в якому зроблені отвори циліндричної форми для закріплення основних блоків. Ці блоки кріпляться в корпусі за допомогою гвинтів. Зверху корпус закривається кришкою, в якій кріпиться рідкокристалічний дисплей для виводу відстані до об'єкта та кнопки керування мікроконтролером і приладом в цілому.

					<i>ПК71.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		62

ВИСНОВКИ

Сучасні далекометрія має велику кількість методів та принципів побудови дефектоскопів, аналізуючи кожен з яких, можна спроектувати найбільш вдалий прилад для тих чи інших поставлених задач.

Основною метою було спроектувати лазерний фазовий далекомір. Було досліджено переваги декількох методів реалізації приладу та проаналізовані можливі варіанти виправлення різних його недоліків. Обрано та спроектовано електричну схему далекоміра, розраховано реалізований підсилювач, який мінімально зашумляв прийнятий сигнал. Розраховано оптичну систему та виконано креслення щодо корпусу приладу. Проведені габаритний та енергетичний розрахунки, які дозволили визначити основні параметри системи: корисний потік на фотоприймачі, відношення сигнал/шуму на виході фотодіода, розраховані діаметри дзеркал та фокусні відстані. Також показали, що розроблена система відповідає вимогам, поставленим до неї у завданні на дипломний проект.

					ПК71.100000.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Куц Ю.В. Магнітний неруйнівний контроль: Навчальний посібник / Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, В.К. Цапенко, В.С. Єременко, Ю.Ю. Лисенко – К: НТУУ ”КПІ”. – 2012. – 139 с.
2. Куц Ю.В. Технології електромагнітного неруйнівного контролю. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 63 с.
3. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263
4. Петрик, В. Ф. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі [Електронний ресурс] / В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 266 с.
5. Лазерна дальнометрія / Л.А. Асніс, В.П. Васильєв, В. Б. Волконський та ін. М.: Радіо та зв'язок, 1995. 256 с.
6. Lee Seok-Hwan et al. Laser rangefinder and method thereof. Intern. Patent WO 2005/006016, 20.01.05, Int. CI Int. CI. G01S 17/10.
7. Карасик В.Є., Орлов В.М. Лазерні системи бачення. М.: Вид. МГТУ ім. Н.Е. Баумана, 2001. 352 с.
8. Баришніков Н.В., Бокшанская В.Б., Карасик В.Є. Приймально-передавальні пристрої лазерних локаційних зображують систем. М.: Вид. МГТУ ім. Н.Е. Баумана, 2004. 84 с.
9. Смолич С.В. З 512 Інженерна геодезія: навч. посібник. / С.В. Смолич, А.Г. Верхотуров - Чита: ЧитГУ, 2009. - 185 с.
10. Денисюк Р. Е., Кузнєцов Д. Н. Лазерний далекомір для систем машинного зору роботів / Збірник тез доповідей Другого регіонального науково-практичного семінару Теоретичні та практичні аспекти

					<i>ПК71.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		64

- приладобудування, 18 квітня 2013, Луганськ, кафедра Прилади, СНУ ім. В. Даля. - с. 20 - 21.
11. Ратхор Т. С. Цифрові вимірювання. Методи і схемотехніка. - М.: Техносфера, 2004. - 371 с.
 12. Геодезичні інструменти // Велика радянська енциклопедія: [в 30 т.] / Гол. ред. А. М. Прохоров. - 3-є вид. - М.: Радянська енциклопедія, 1969-1978.
 13. Лемтюжников Д.С. Елементарний курс оптики і далекомірів, Воениздат, 1938, 136 с.
 14. Поляков В. Т. Радіолюбителям про техніку прямого перетворення. - М.: Патріот, 1990. - 264 с.
 15. Солодилов К.Є. Військові оптико-механічні прилади, Оборонпром, 1940, 263 с.
 16. Климко Ю.Н. Основи розрахунку оптико-локаційних приладів з лазерами. М., 1978.
 17. Ставрів А.А., Поздняков М.Г. Рефракційні параметри атмосфери і їх вплив на точності характеристики лазерних далекомірів. Мн., 2003.
 18. Хінрікус Х.В. Шуми в лазерних інформаційних системах. М., 1987.
 19. В.Є. Карасика «Лазерні прилади та методи вимірювання дальності». М.: 2012 вид. МГТУ ім. Н.Е. Баумана

					<i>ПК71.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		65