

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)

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ
ЛАЗЕРНОЇ ДАЛЬНОМЕТРІЇ
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ЛОЕТМ-18-1
Каленюк Д. М.
(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 _____
(підпис)

Мачехін Ю.П.
(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-вимірвальна 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 Каленюку Дмитру Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності методів лазерної дальнометрії

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

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 18 грудня 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи Двопроміневий лазерний далекомір. $\alpha = 10^\circ$. $H = 300$ км. (низькоорбітальний ШСЗ), $2\alpha_s = 0,1; 1; 2$ мрад. $V_1 = 2; 14$ м/с.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Аналіз існуючих методів лазерної дальнометрії та типів далекомірів. 2 Порівняння переваг та недоліків методів лазерної дальнометрії. 3 Розрахунок похибки лазерного далекоміра на прикладі вимірювання перепаду висот морської поверхні.

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

Кресленик загального виду: фемтосекундного далекоміра – А1

Демонстраційний матеріал – 10 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел по лазерній дальнометрії та її областей застосування .	04.11.19 – 16.11.19	Виконано
2	Дослідження методів лазерної дальнометрії та їх переваг та недоліків	17.11.19 – 24.11.19	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків для оцінки похибки вимірювання відстаней морської поверхні лазерними далекомірами	25.11.19 – 30.11.19	Виконано
4	Аналіз результатів розрахунків та формулювання висновків дослідження	01.12.19 – 03.12.19	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	04.12.19 – 10.12.19	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	11.12.19 – 12.12.19	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	13.12.19 – 16.12.19	Виконано
8	Підготовка та захист атестаційної роботи	17.12.19 – 20.12.19	

Дата видачі завдання 03 листопада 2019 р.

Студент _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи: 65 стор., 12 рис., 3 табл., 17 джерел, 2 додаток.

ДАЛЕКОМЕТРІЯ, ЧАСТОТА, ФАЗА, ІМПУЛЬС, АМПЛІТУДА, ЛАЗЕР, ДОВЖИНА ХВИЛІ, СИГНАЛ, ДАЛЕКОМІР, ФОТОПРИЙМАЧ, ШВИДКІСТЬ СВІТЛА.

Об'єкт дослідження – методи лазерної дальнометрії.

Мета роботи – моделювання та оптимізація параметрів далекоміра.

Метод розрахунку – аналітичний та чисельний.

Проведено аналіз розвитку сучасної лазерної дальнометрії. Розглянуто методи розрахунку та вимірювання дальності за допомогою різних типів далекомірів: імпульсних, фазових та імпульсно-фазових. Описані параметри та фактори, які впливають на точність далекомірів. Проаналізовано переваги та недоліки існуючих напрямків дальнометрії та які типи лазерів використовуються в цій галузі. Розрахована похибка лазерного далекоміра на прикладі вимірювання перепаду висоти морської поверхні.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 65 p., 12 figures, 3 tables., 17 sources, 2 application.

RANGEFINDER, PHASE, LASER, IMPULSE, FREQUENCY, AMPLITUDE, WAVE LENGTH, SIGNAL, PHOTO DETECTOR, SPEED OF LIGHT.

The object of study - methods of laser rangefinding.

The purpose of the work is to simulate and optimize the laser rangefinder parameters.

The method of calculation is analytical and numerical.

The analysis of the development of modern laser rangefinder is carried out. Methods of calculation and measurement of range using different types of rangefinders are considered: pulse, phase and pulse-phase. Parameters and factors that affect the accuracy of the range finders are described. The advantages and disadvantages of existing rangefinders and the types of lasers used in this field are analyzed. The error of the laser rangefinder on the example of measuring the difference in the height of the sea surface is calculated.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка аттестационной работы: 65 стр., 12 рис., 3 табл., 17 источников, 2 приложение.

ДАЛЕКОМЕТРИЯ, ЧАСТОТА, ФАЗА, ИМПУЛЬС, АМПЛИТУДА, ЛАЗЕР, ДЛИНА ВОЛНЫ, СИГНАЛ, ДАЛЬНОМЕРЫ, ФОТОПРИЕМНИК, СКОРОСТЬ СВЕТА.

Объект исследования – методы лазерной дальнометрии.

Цель работы – моделирование и оптимизация параметров дальномера.

Метод расчета – аналитический и численный.

Проведен анализ развития современной лазерной дальнометрии. Рассмотрены методы расчета и измерения дальности с помощью различных типов дальнометров: импульсных, фазовых и импульсно-фазовых. Описаны параметры и факторы, влияющие на точность дальнометров. Проанализированы преимущества и недостатки существующих направлений дальнометрии и типы лазеров, использующиеся в этой области. Рассчитана погрешность лазерного дальномера на примере измерения перепада высоты морской поверхности.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Лазерна дальнометрія.....	10
1.1 Види лазерних далекомірів.....	10
1.1.1 Лазерні імпульсні далекоміри.....	10
1.1.2 Лазерні фазові далекоміри.....	14
1.1.3 Лазерні імпульсно-фазові далекоміри.....	19
1.2 Сучасні напрямки дальнометрії.....	23
1.2.1 Лазерна дальнометрія військового призначення.....	23
1.2.2 Лазерні далекоміри в геодезії	27
1.2.3 Застосування лазерних далекомірів в космонавтиці.....	29
1.3 Приклади технічної реалізації сучасних далекомірів.....	31
2 Розрахунок похибки лазерного далекоміра	34
2.1 Параметри та точність далекомірів.....	34
2.1.1 Фазова і групова швидкості світла.....	34
2.1.2 Фізичне поняття показника заломлення атмосфери.....	39
2.1.3 Вплив точності визначення показника заломлення	42
2.1.4 Фактори які впливають на точність далекомірів.....	43
2.2 Лазери які використовуються в дальнометрії.....	46
2.2.1 Фемтосекундний лазерний далекомір.....	46
2.2.2 Двох/Трьох частотні лазерні далекоміри.....	51
2.3 Оцінка похибки лазерного далекоміра	54
2.3.1 Постановка завдання	55
2.3.2 Середня затримка лазерного луна-імпульсу	56
2.3.2 Визначення значення перепаду висот морської поверхні...	58
Висновки.....	63
Перелік джерел посилання.....	64
Додаток А Графічний матеріал.....	66
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	68

ВСТУП

Лазерна дальнометрія набула широкого поширення в багатьох сферах життєдіяльності людини: у військовій справі, навігації, геодезії, топографічній зйомці, фотографії та багатьох інших. Принцип роботи лазерних далекомірів заснований на двох методах вимірювання: фазовому і імпульсному, кожен з яких має свої переваги й недоліки. Сучасні лазерні далекоміри дозволяють в найкоротший термін і з великою точністю визначити відстань до об'єкта, що цікавить.

В основі лазерної дальнометрії лежить три основних властивості електромагнітних хвиль: здатність відбиватися від об'єктів, поширюватися прямолінійно і з постійною швидкістю. Висока точність визначення дальності лазерним далекоміром досягається при роботі з предметами, що володіють максимальним відбиваючим ефектом.

Однак в метрологічному аспекті для оптико-електронних пристроїв даного типу і зараз залишається ще багато невирішених проблем. Траєкторія поширення оптичного випромінювання відрізняється від геометричної прямої внаслідок неоднорідності показника заломлення в різних шарах атмосфери. На швидкість поширення лазерного променя також впливають температура, вологість повітря і тиск. Максимальну дальність роботи лазерного далекоміра визначає склад атмосфери, компоненти якого поглинають і розсіюють оптичне випромінювання. Найбільш істотними факторами, що впливають на точність вимірювання лазерного далекоміра, є: атмосферний вплив і точність визначення часу поширення сигналу.

Здатність електромагнітного випромінювання поширюватися з постійної швидкістю дає можливість визначати дальність до об'єкта.

Задача визначення відстані між далекоміром і об'єктом зводиться до вимірювання відповідного інтервалу часу між зондуючим сигналом і сигналом, відбитим від об'єкта. Розрізняють три методи вимірювання дальності в залежності від того, який характер модуляції лазерного

випромінювання використовується в далекомірі: імпульсний, фазовий або фазо-імпульсний [1].

Сутність імпульсного методу дальнометрії полягає в тому, що до об'єкта посилають зондуєчий імпульс, він же запускає тимчасовий лічильник у далекомірі. Коли відбитий об'єктом імпульс приходить до далекоміру, то він зупиняє роботу лічильника. За часовим інтервалом (затримки відбитого імпульсу) визначається відстань до об'єкта.

При фазовому методі дальнометрії лазерне випромінювання модулюється за синусоїдальним законом за допомогою модулятора (електрооптичного кристала, що змінює свої параметри під впливом електричного сигналу) [2]. Зазвичай використовують синусоїдальний сигнал з частотою від 10 Гц до 150 МГц (вимірювальна частота). Відбите випромінювання потрапляє в приймальну оптику і фотоприймач, де виділяється модулюючий сигнал. Залежно від дальності до об'єкта змінюється фаза відбитого сигналу щодо фази сигналу в модуляторі. Вимірюючи різницю фаз, визначають відстань до об'єкта. Реалізація імпульсно-фазового методу, заснована на реєстрації запізнювання відбитого імпульсу через зміну значення фази опорного сигналу. В даному методі не потрібна складна модуляція імпульсу випромінювання, що робить можливим застосування імпульсних випромінювачів з простим генератором струму накачування, а також вдається уникнути застосування складної аналогової частини схеми обробки сигналу.

Метою даної атестаційної роботи є аналіз існуючих методів підвищення ефективності лазерної дальнометрії, порівняння реалізації методів імпульсно-фазової дальнометрії, а також розрахунок залежності точності вимірювання дистанції від параметрів імпульсного далекоміра.

1 ЛАЗЕРНА ДАЛЬНОМЕТРІЯ

1.1 Види лазерних далекомірів

Існує три основні групи лазерних далекомірів:

- лазерні імпульсні далекоміри;
- лазерні фазові далекоміри;
- лазерні імпульсно-фазові далекоміри.

1.1.1 Лазерні імпульсні далекоміри

Принцип дії лазерних імпульсних далекомірів, заснований на вимірюванні інтервалу часу між моментом випромінювання зондуючого лазерного моноімпульса (старт-імпульс) і моментом прийому випромінювання, відбитого від об'єкта (стоп-імпульс) [3]. Джерелом випромінювання в таких приладах є імпульсний лазер (зазвичай твердотільний або напівпровідниковий), випромінювання якого колімується за допомогою оптичної формуючої системи. При формуванні лазерного імпульсу частина лазерного випромінювання відводиться (наприклад, за допомогою світлоподілювача) на фотоприймальний пристрій ФПП1. Відбите від об'єкта випромінювання потрапляє в приймальний канал, що складається з приймального об'єктива, ФПП2 (приймача випромінювання) і підсилювача сигналу. Вимірювач часових інтервалів (ВЧІ) починає роботу в момент випромінювання лазерного імпульсу по сигналу ФПП1 і завершує її в момент прийому відбитого випромінювання за сигналом ФПП2, видаючи цифровий код отриманого результату. Блок синхронізації і управління здійснює інтерпретацію і підвищення точності отриманих результатів, формує сигнал на індикаторі, а також приймає команди органів управління.

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):

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

де c – швидкість світла у вакуумі;

Δt – інтервал часу між моментами відправки і прийому випромінювання зондуючого імпульсу;

n – показник заломлення середовища поширення для використаної довжини хвилі випромінювання.

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 можуть бути здійсненні: наприклад, при розташуванні далекоміра на повітряному судні і скануванні їм об'єктів на Землі необхідно враховувати явище рефракції, що приводить до викривлення оптичного шляху лазерного випромінювання. При лазерній локації в турбулентних середовищах оптичний шлях лазерного випромінювання також спотворюється (відрізняється від прямолінійного).

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

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

- похибку, яка обумовлена кінцевою дискретністю вимірювача часових інтервалів;

- похибка тимчасової фіксації імпульсів випромінювання.

Систематичну похибку, яка обумовлена різним часом затримки сигналу в каналах фіксації випромінюваного (старт) і прийнятого (стоп-) імпульсів, можна або мінімізувати, або, внаслідок систематичності її характеру, врахувати при вимірюванні тимчасового інтервалу. Мінімізація цієї похибки можлива при схемній компенсації, а при схемі суміщеного старту, коли старт і стоп-імпульси подаються на один приймач випромінювання, вона компенсується повністю. У системах без поєднаного старту цю систематичну похибку можна врахувати за допомогою багаторазового вимірювання каліброваної дистанції.

Вплив дискретності вимірювача часових інтервалів при несинхронності його внутрішньої тактової частоти з моментами випромінювання зондуєчого імпульсу можна оцінити по дисперсії пов'язаної з нею похибки:

$$D = \frac{\Delta d^2}{6}, \quad (1.2)$$

де Δd – дискретність вимірювача часових інтервалів в одиницях дальності.

Зважаючи на це, середнє квадратичне відхилення оцінки дальності складе

$\delta = 0,408\Delta d$. При використанні тактового генератора для вимірювача часових інтервалів з частотою від 150 Гц до 300 МГц похибка, викликана дискретністю, складе від 0,1 м до 0,2 м.

Похибка тимчасової фіксації імпульсів випромінювання в основному пов'язана з прийомом відбитого від об'єкта лазерного імпульсу – потужність сигналу може змінюватися на кілька порядків залежно від дальності до об'єкта і його коефіцієнта відбиття, стану шару середовища поширення випромінювання. Крім того, на сигнал накладаються шуми і перешкоди приймального каналу і каналу поширення. Все це призводить до сильних спотворень форми прийнятого сигналу і, як наслідок, до похибки фіксації моменту приходу даного імпульсу граничним пристроєм (рис. 1.1).

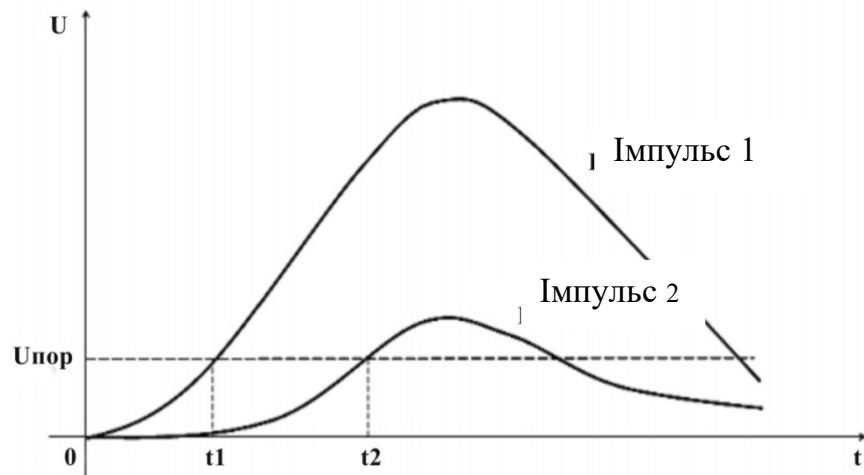


Рисунок 1.1 – Тимчасова фіксація імпульсу за часом

На рисунку: t_1, t_2 – моменти фіксації відбитих імпульсів; $U_{пор}$ – поріг спрацьовування.

Найбільш поширений метод часової прив'язки прийнятого імпульсу випромінювання шляхом фіксації його за рівнем граничним пристроєм (наприклад, швидкодіючим компаратором). У цьому випадку момент приходу імпульсу випромінювання фіксується при перетинанні порога спрацьовування і залежить як від тривалості фронту імпульсу, так і від усіх параметрів (властивостей об'єкту, стану атмосфери і т. д.), які деформують форму прийнятого сигналу. При збереженні форми сигналу розкид моменту фіксації дорівнює тривалості фронту імпульсу, тому до лазерного джерела в високоточних далекомірах пред'являють вимоги мінімальності тривалості імпульсу і максимізації добротності. Найчастіше використовують імпульсні лазери з тривалістю імпульсу 10 нс і менше. Якщо вимоги до точності фіксації імпульсу дуже високі, застосовують методи фіксації максимуму імпульсу і точки перетину нуля похідної. Ці методи порівняно легко реалізуються і дають високу точність фіксації, проте вони ефективні лише в лінійній області зміни сигналу.

Як було показано вище, лазерні далекомірні методи засновані на визначенні тривалості часу, протягом якого імпульсний сигнал проходить подвійну відстань від далекоміра до відбивача. Лазерні далекоміри повинні вимірювати відстані від часток метра до десятків кілометрів, що відповідає вимірювальному тимчасовому інтервалу від наносекунд до мілісекунд. Час вимірювання лазерними далекомірами незмінно і визначається оператором. Це спрощує отримання задовільної сталої роздільної здатності і знижує вимоги до вимірювача часових інтервалів (ВЧІ).

Роздільна здатність ВЧІ має бути набагато вище, ніж дозвіл всієї далекомірної системи в цілому, яке визначається рівнем шумів і часом вимірювання. Дозвіл ВЧІ можна поліпшити за допомогою усереднення, що, в свою чергу, збільшує час вимірювання.

Ще два не менш важливі параметри вимірювання тимчасових інтервалів - лінійність і стабільність. Лінійність разом з флуктуаційною похибкою пристрою часової прив'язки визначає абсолютну точність лазерного далекоміра. Стабільність лазерного далекоміра визначається не тільки дрейфом ВЧІ, хоча він є одним з основних джерел похибок. В цілому стабільність ВЧІ не суттєва для точних вимірювань, оскільки лазерний далекомір неодноразово калібрується в процесі вимірювань [1].

1.1.2 Лазерні фазові далекоміри

Лазерні фазові далекоміри на відміну від розглянутих вище імпульсних далекомірів мають істотно меншу дальність вимірювання, але при цьому набагато більшу точність вимірювань. Такі відмінності пояснюються тим, що в якості джерела випромінювання в лазерних фазових далекомірах використовується безперервний напівпровідниковий лазер або світлодіод, випромінювання яких промодельованого одним або декількома гармонійними сигналами.

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

Відстань, яку проходить світлова хвиля за час t , дорівнює

$$l = ct , \quad (1.3)$$

де c – швидкість світла.

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

$$\varphi = 2\pi f_m t , \quad (1.4)$$

де f_m – частота модуляції випромінювання.

Таким чином, дальність до об'єкта можна визначити з виразів (1.3) і (1.4) як:

$$l = c \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_m} . \quad (1.5)$$

При вимірюванні фази виникає похибка $\Delta\varphi$. Відповідна погрішність у вимірі відстані Δl складе:

$$\Delta l = c \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_m} . \quad (1.6)$$

Аналіз формули (1.6) дозволяє зробити висновок, що похибка вимірювання дальності Δl тим нижче, чим вище частота модуляції, але для

однозначного визначення дальності зміна фази φ на вимірюваній відстані повинно бути менше 2π , тобто подвійна відстань не повинна перевищувати довжину хвилі модуляції f_m . Це накладає обмеження на максимально допустиме значення частоти модуляції. Як правило, в далекомірах використовують не одну, а кілька частот модуляції. Низька частота визначається максимальною дальністю вимірювання, наступні частоти – похибкою вимірювання на попередній частоті. Остання частота модуляції визначається похибкою $\Delta\varphi$ і необхідною точністю вимірювань з рівняння (1.6).

У далекомірах використовуються інтегральні фазові детектори, що вимірюють різницю фаз між вхідним і опорним сигналами від 0° до 180° (при більшому фазовому діапазоні виникає неоднозначність) [4]. У цьому випадку необхідно, щоб при проходженні випромінюванням відстані до об'єкта і назад фаза змінювалася на величину, що не перевищує π , тобто щоб подвійна відстань до об'єкта відповідала половині довжини хвилі частоти модуляції, (рис.1.2). При цьому максимальна дальність визначиться за допомогою формули:

$$2l_{\max} \leq \frac{1}{2}T_1c, \quad (1.7)$$

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

Тоді перша частота модуляції:

$$f_{1,m} \leq \frac{c}{4l_{\max}}. \quad (1.8)$$

Зазвичай для фазових детекторів похибка вимірювання фази за допомогою аналогових інтегральних фазометрів становить від $0,5^\circ$ до $1,0^\circ$.

Якщо похибка істотно перевищує необхідну, потрібно використовувати ще одну, більш високу частоту модуляції.

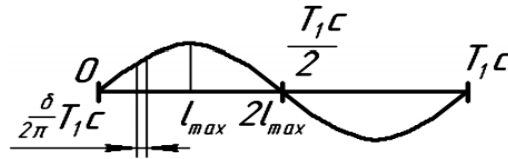


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення одного періоду модулюючого випромінювання і його співвідношення з дальністю, що вимірюється

Для однозначного визначення відстані необхідно, щоб похибка на першій частоті модуляції не перевищувала половину довжини хвилі другої частоти модуляції, тобто:

$$\Delta l_1 \leq \frac{1}{2} T_2 c \Rightarrow f_{2,m} \leq \frac{c}{2 \Delta l_1}, \quad (1.9)$$

де T_2 – період модуляції випромінювання на другій частоті.

На частоті $f_{2,m}$ похибка вимірювання відстані складе:

$$\Delta l_2 = \frac{c \delta \varphi_2}{2 \pi f_2}. \quad (1.10)$$

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

При вимірюванні на частотах $f_{1,m}$ і $f_{2,m}$ будуть отримані значення зсуву фаз φ_1 і φ_2 .

Схематичне зображення процесу поширення модульованого лазерного випромінювання представлено на рис. 1.3.

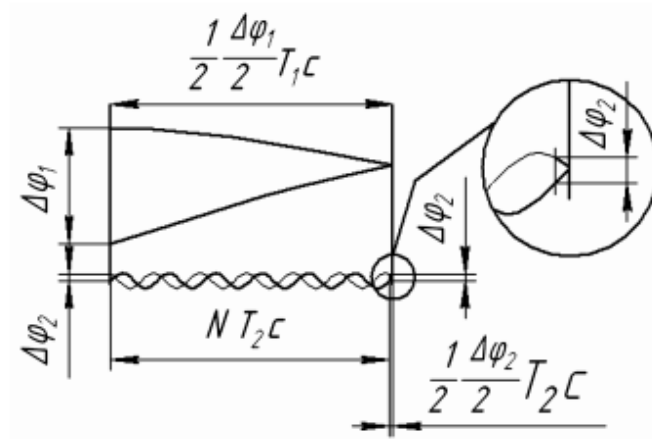


Рисунок 1.3 – Ілюстрація процесу поширення модульованого лазерного випромінювання.

Відстань до об'єкта і назад відповідає частині хвилі низькочастотної модуляції:

$$l = \frac{c\varphi_1}{2\pi f_{1,m}} . \quad (1.11)$$

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

$$l = N \frac{c}{f_{2,m}} + \frac{c\varphi_2}{2\pi f_{2,m}} . \quad (1.12)$$

Остаточна відстань до об'єкта визначається вирішенням системи рівнянь:

$$\begin{cases} l = \frac{c\varphi_1}{2\pi f_{1,m}}; \\ l = N \frac{c}{f_{2,m}} + \frac{1}{2} \frac{c\varphi_2}{2\pi f_{2,m}} \end{cases} , \quad (1.13)$$

де N знаходять як цілу частину від вираження:

$$\frac{f_{2,m}}{4\pi} \left(\frac{2\varphi_1}{f_{1,m}} - \frac{\varphi_2}{f_{2,m}} \right). \quad (1.14)$$

Потім отримують відстань до об'єкта за формулою:

$$l = N \frac{c}{f_{2,m}} + \frac{1}{2} \frac{c\varphi_2}{2\pi f_{2,m}}. \quad (1.15)$$

Недоліком даного принципу побудови далекоміра є висока частота модуляції сигналу. Крім того, при великій відстані до зондуемого об'єкта і одночасно високої точності вимірювань (на рівні від 1 мм до 5 мм) можуть знадобитися три і більше частоти модуляції. Це призводить до ускладнення електричної схеми, а також до високого рівня шумів в електронному тракті, що значно знижує точність вимірювань.

1.1.3 Лазерні імпульсно-фазові далекоміри

Перший імпульсно-фазовий далекомір ГДФІ-1 з внутрішньо-імпульсною модуляцією випромінювання був розроблений в державному оптичному інституті в кінці 60-х років [5]. У цьому приладі зондуемым сигналом є послідовність імпульсів випромінювання напівпровідникового лазера тривалістю 1 мкс і частотою повторення 500 Гц. Імпульси випромінювання моделювалися по інтенсивності гармонійним сигналом частотою 6 МГц. Далекомір побудований за схемою з модуляційним фазовим детектуванням фотоприймачем і вимірюванням різниці фаз компенсаційним методом за допомогою фазообертувача. Режим детектування забезпечувався опорною напругою з частотою модуляції що подається на зовнішній електрод

помножувача ФЕУ-28 і фазою, що змінюється стрибком на 180° з частотою проходження імпульсів випромінювання.

За результатами випробувань похибка вимірювання відстаней склала близько 7 см, що відповідає похибкам вимірювання безперервно-фазових далекомірів при аналогічних частотах модуляції і методі вимірювання різниці фаз.

У наступних модифікаціях подібних далекомірів [6 – 8] використовувалися частоти модуляції імпульсів випромінювання, що перевищують 100 МГц, і перетворення частоти фотоприймачем (ФЕП), а різниця фаз вимірювалася на низькій проміжній частоті час-імпульсним способом.

Типовим прикладом таких пристроїв є імпульсно-фазовий далекомір для маркшейдерсько-геодезичних вимірювань. Джерелом випромінювання служить напівпровідниковий лазер, що випромінює імпульси тривалістю 30 нс з частотою повторення 14985 кГц, модульовані по інтенсивності високочастотними імпульсами, що впливають із частотою 149850 кГц. Випромінювання з дистанції приймається фотоелектронним помножувачем, який працює в режимі перетворення частоти модуляції.

Очевидно, що, як і в безперервно-фазових далекомірах, збільшення частоти модуляції імпульсів випромінювання дозволяє підвищити точність вимірювання відстаней. Експериментальна похибка вимірювання розглянутого далекоміра склала від 6 мм до 9 мм, що істотно більше, ніж в безперервно-фазових далекомірах з аналогічною частотою модуляції. Застосування внутрішньоімпульсної модуляції випромінювання напівпровідникових лазерів (особливо з великою імпульсною потужністю) дозволяє істотно зменшити просторово-часову неоднорідність їх випромінювання, яка багато в чому визначає похибка вимірювання відстаней далекомірами на їх основі. Однак повністю виключити просторово-часову неоднорідність напівпровідникових лазерів не вдається, і в даному випадку отримана похибка, очевидно, характеризує залишкову неоднорідність поля випромінювання використаного в далекомірі лазера.

Безсумнівний інтерес представляє також далекомір з внутрішньоімпульсною модуляцією випромінювання твердотілого лазера на алюмоітрієвому гранаті. У цьому далекомірі застосований спеціально розроблений лазер, що генерує поодинокі гладкі імпульси випромінювання тривалістю близько 150 нс. Високочастотну модуляцію імпульсів випромінювання по інтенсивності виконує електрооптичний модулятор. Для вирішення неоднозначності вимірювання проводяться послідовно за трьома імпульсами, модульованими трьома близькими частотами в діапазоні 150 МГц. Приймачем випромінювання служить лавинний фотодіод ЛФД-2. Прилад побудований за схемою з подвійним перетворенням частоти модуляції в електронних змішувачах. За допомогою гетеродину вона послідовно знижується до 1,5 МГц і 47 кГц, на останній і виробляються фазові вимірювання. Застосування твердотілого лазера з імпульсною потужністю більше 100 Вт дозволило збільшити дальність дії далекоміра до 500 м при роботі по дифузним поверхням. Електронна схема далекоміра досить складна, але це багато в чому виправдано дуже малою похибкою вимірювання відстаней (від 1 мм до 3 мм) і високим ступенем автоматизації процесу вимірювань за допомогою вбудованого мікропроцесора.

Першими імпульсно-фазовими далекомірами без додаткової модуляції імпульсів випромінювання є прилади ГДФІ-2 і ГДФІ-3, в яких джерелом випромінювання служать імпульсні напівпровідникові лазери. Більш досконалий далекомір ГДФІ-3 (рис. 1.4) побудований за схемою з частотним перетворенням в ФЕП, де різниця фаз вимірюється час-імпульсним методом. Його відрізняє відсутність внутрішньоімпульсної модуляції, використання фільтрів нижніх частот, включених на вході вузькосмугових підсилювачів замість пікових детекторів, і здійснення в імпульсному підсилювачі стробування прийнятої імпульсної послідовності для виключення шуму в проміжках між імпульсами. Як джерело випромінювання використаний лазерний діод ЛД-13, що генерує імпульси випромінювання потужністю 5 Вт, тривалістю близько 100 нс і частотою повторення 6 кГц. В якості масштабної

використовувалася частота 5 МГц, що забезпечувала виконання умови $T_r = 2\tau_i$ при даній тривалості імпульсу випромінювання. Фаза вимірювалася на проміжній частоті близькій 1 кГц.

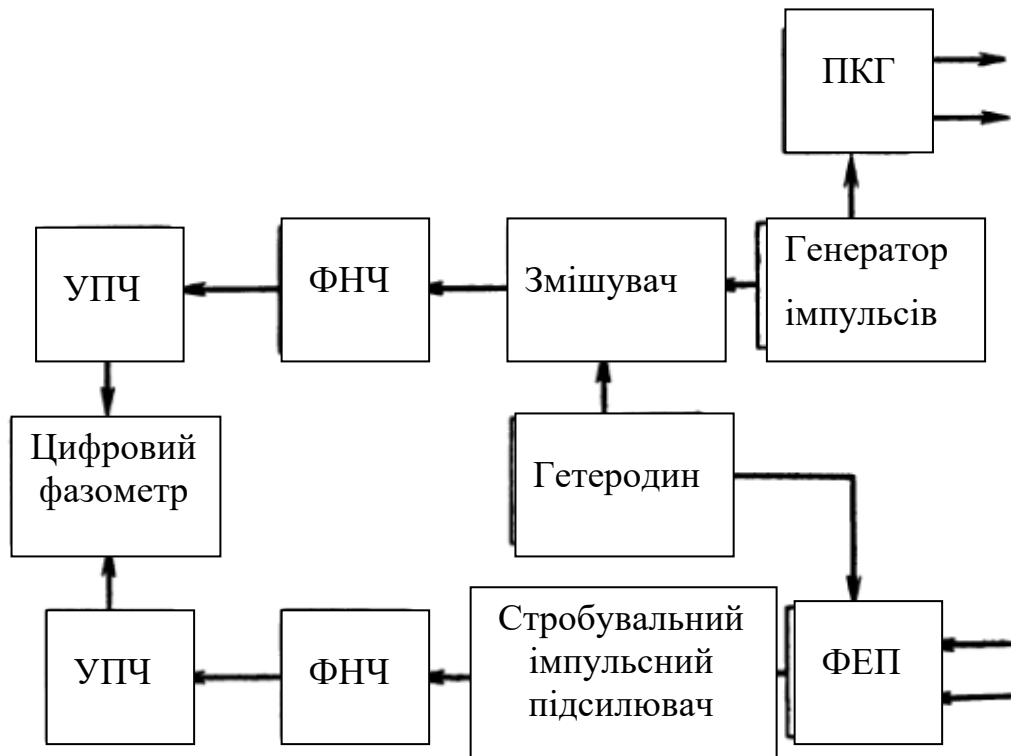


Рисунок 1.4 – Структурна схема далекоміра ГДФІ-3

За результатами випробувань далекоміра його похибка вимірювання склала в різних умовах 2 – 10 см, а в ряді випадків і більш, що є наслідком значної просторово-часової неоднорідності використаного лазера. Стробування сигналу дозволяє вимірювати відстані до 250 м по дифузним поверхням і більше 8 км по кутовому відбивачу. Оцінка наявного запасу по енергетиці показала, що можлива дальність дії далекоміра при роботі по кутовий відбивач площею 100 см² становить 12 – 13 км.

Принцип вимірювання відстаней, використаний в ГДФІ-3, покладений в основу цілого ряду імпульсно-фазових світлодалекомірів, серійне виробництво яких триває до теперішнього часу.

Першим в цій серії був далекомір СМ5 [13], що відрізняється високою частотою повторення імпульсів (14985,5 кГц) випромінювання тривалістю 15-30нс, що є еквівалентом масштабної частоти безперервно-фазових далекомірів. Це дозволило підвищити середню потужність зондуючого оптичного сигналу і виключило необхідність у стробуванні прийнятої імпульсної послідовності. Іншою особливістю приладу є використання в якості гетеродинного сигналу такої ж послідовності імпульсів. З сигналу із виходу фотоелектронного перетворювача (ФЕП) за допомогою фільтра нижніх частот виділяється напруга проміжної частоти, що дорівнює різниці частот повторення імпульсів основної і гетеродинної послідовностей. Основна увага в цих приладах приділена підвищенню точності вимірювань і дальності дії, а також автоматизації процесу вимірювань і поліпшенню масогабаритних характеристик. Для цього використовується нова елементна база і більш досконалі схемно-конструкторські рішення вузлів далекомірів.

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, що мають джерела безперервного випромінювання, але щодо точності імпульсні системи поступаються фазовим. У зв'язку з цим досить перспективною виглядає система, в якій імпульсний характер випромінювання поєднувався б з фазовим методом індикації принципом обробки сигналів, що дозволяє об'єднати переваги двох методів дальнометрії.

1.2 Сучасні напрямки дальнометрії

1.2.1 Лазерна дальнометрія військового призначення

Лазерна дальнометрія є однією з перших областей практичного застосування лазерів у закордонній військовій техніці. Перші дослідження відносяться до 1961р., а зараз лазерні далекоміри використовуються в

наземній військовій техніці (артилерійські, танкові), в авіації (далекоміри, висотоміри, цілевказники), і на флоті. Ця техніка пройшла бойові випробування у В'єтнамі і на Близькому Сході. В даний час ряд далекомірів прийнятий в арміях ряду країн.

Перший лазерний далекомір ХМ-23 пройшов випробування у В'єтнамі і був прийнятий на озброєння в армії США. Він був розрахований на використання передових спостережних пунктах сухопутних військ. Джерелом випромінювання в ньому був лазер з вихідною потужністю 2,5 Вт і тривалістю імпульсу 30 нс. У конструкції далекоміра широко використовувалися інтегральні схеми. Випромінювач, приймач і оптичні елементи змонтовані в моноблоці, який має шкали точного відліку азимута і кута місця мети. Харчування далекоміра здійснювалося від батареї нікелево-кадмієвих акумуляторів напругою 24 В, що забезпечує 100 вимірювань дальності без підзарядки.

Один з перших серійних моделей – шведський далекомір, призначений для використання в системах управління бортової корабельної і берегової артилерії. Конструкція далекоміра відрізнялася особливою міцністю, що дозволяло застосовувати його в складних умовах. Далекіомір можна було сполучати при необхідності з підсилювачем зображення або телевізійним візором. Режимом роботи далекоміра передбачалося або вимірювання через кожні 2 с протягом 20 с, або через кожні 4 с протягом тривалого часу.

З початку 70-х років на зарубіжних танках встановлюються лазерні далекоміри. Установка лазерних далекомірів на танки відразу зацікавила зарубіжних розробників озброєння. Це пояснюється тим, що на танку можна ввести далекомір в систему управління вогнем танка, ніж підвищити його бойові якості. У порівнянні з оптичними вони мають ряд переваг: високу швидкодію, автоматизований процес введення вимірюваної дальності в прицільні пристрої, високу точність вимірювання, малі розміри, вага і т. д. Для цього в США був розроблений далекомір AN/VVS-1 для танка М60А. Він не відрізнявся за схемою від лазерного артилерійського далекоміра на рубіні,

проте крім видачі даних про дальності на цифрове табло мав пристрій, що забезпечує введення дальності в обчислювальній машині системи управління вогнем танка. При цьому вимір дальності міг проводитися як навідником гармати так і командиром танка. Режим роботи далекоміра – 15 вимірювань в хвилину протягом однієї години.

Лазерні далекоміри, встановлені на сучасних танках, дозволяють вимірювати дальність до цілі в межах від 200 м до 8 000 м (на американських і французьких танках) і від 200 м до 10 000 м (на англійських і західнонімецьких танках) з точністю до 10 м. Більшість активних елементів лазерних далекомірів, що встановлюються в даний час на танках і БМП західного виробництва, створені на основі кристала граната з домішкою неодиму (активний елемент - кристал іттрієво-алюмінієвого граната $Y_3Al_5O_{12}$, в який в якості активних центрів введені іони неодиму Pr^{3+}). Ці лазери генерують випромінювання на довжині хвилі 1,06 мкм. Є також лазерні далекоміри, в яких активним елементом служить кристал рожевого рубіна. Тут основою є кристал окису алюмінію Al_2O_3 , а активними елементами іони хрому Cr^{3+} . Лазери на рубіні генерують випромінювання на довжині хвилі 0,69 мкм.

Останнім часом на зарубіжних бойових машинах почали застосовуватися лазерні далекоміри на вуглекислому газі. У CO_2 -лазері в газорозрядній трубці знаходиться суміш, що складається з вуглекислого газу (CO_2), молекулярного азоту (N_2) і різних невеликих добавок у вигляді гелію, парів води і т. Д. Активні центри – молекули CO_2 . Перевага лазера на двоокису вуглецю полягає в тому, що його випромінювання (довжина хвилі 10,6 мкм) відносно безпечно для зору і забезпечує краще проникнення через дим і туман. Крім того, лазер постійного випромінювання, що працює на цій довжині хвилі, може використовуватися для підсвічування мети при роботі з тепловізорним прицілом.

Бурхливий розвиток мікроелектроніки забезпечив зменшення масогабаритних показників лазерних далекомірів, що дозволило створити

портативні далекоміри. Дуже вдалим виявився норвезький лазерний далекомір LP-4. Він мав як модулятор добротності оптико механічний затвор. Приймальна частина далекоміра є одночасно візором оператора. Діаметр оптичної системи складає 70 мм. Приймачем служить портативний фотодіод. Лічильник забезпечений схемою стробування по дальності, чинний з установки оператора від 200 м до 3000 м. У схемі оптичного візира перед окуляром поміщений захисний фільтр для запобігання очі від впливу свого лазера при прийомі відбитого імпульсу. Випромінювач і приймач змонтовані в одному корпусі. Кут місця мети визначається приблизно до 25° . Акумулятор забезпечував 150 вимірювань дальності без підзарядки, його маса всього 1 кг. Далекомір був закуплений Канадою, Швецією, Данією, Італією, Австралією.

Портативні лазерні далекоміри були розроблені для піхотних підрозділів і передових артилерійських спостерігачів. Один з таких далекомірів виконаний у вигляді бінокля. Джерело випромінювання і приймач змонтовані в загальному корпусі з монокулярним оптичним візором шестиразового збільшення, в поле зору якого є світлове табло з світлодіодів, добре помітних як вночі, так і вдень. У лазері в якості джерела випромінювання використовується алюмінієво-ітрієві гранат, з модулятором добротності на ніобіті літію. Це забезпечує пікову потужність в 1,5 МВт. У приймальній частині використовується здвоєний лавинний фотодетектор з широкосмуговим малошумливим підсилювачем, що дозволяє детектувати короткі імпульси з малою потужністю. Помилкові сигнали, відбиті від сусідніх предметів виключаються з допомогою схеми стробування по дальності. Джерело живлення – малогабаритна акумуляторна батарея, що забезпечує 250 вимірювань без підзарядки. Електронні блоки далекоміра виконані на інтегральних схемах, що дозволило довести масу далекоміра разом з джерелом живлення до 2 кг.

1.2.2 Лазерні далекоміри в геодезії

З появою перших газових лазерів на початку шестидесятих років минулого століття для геофізичних досліджень були створені лазерні інтерференційні деформографи з мікрометровою інструментальною чутливістю [1]. Ці прилади використовуються в зонах геологічних розломів порід для вимірювання відносних лінійних деформацій літосферних плит. Вимірювання виконуються лазерними інтерферометрами з фіксацією лінійних через трансформаційних змін довжин на відстанях до 1 км за показаннями інтерферометра з похибкою до часткою мікрметрів. Для виключення впливу атмосфери на точність інтерференційних вимірів в деформографах, створених в 1961 р., випромінювання лазера проходить контрольовану відстань близько 1 км до відбивача і назад в вакуумованих трубах з прозорими торцями [1].

При виконанні геодезичних лінійних вимірювань часто потрібні не так відносні, як абсолютні значення вимірюваних довжин порядку 1 км з мікрометровою похибкою. У відносних інтерферометрах без прокатки відбивача уздовж лінії визначається інформація лише про зміни довжини вимірюваної лінії, в той час як абсолютні інтерферометри дозволяють вести вимірювання одним далекоміром поперемінно на кілька відбивачів, не втрачаючи інформації про абсолютних значеннях вимірюваних довжин. Це дозволяє визначати і відстежувати деформації і зміни довжин в реальному часі. Крім того, абсолютні інтерферометри можуть бути використані як для створення еталонних базисів, так і для стеження за зміщенням та деформаціями різних елементів і блоків гребель великих ГЕС, ядерних реакторів і інших стратегічно важливих об'єктів.

Оскільки інструментальна чутливість сучасних електронних далекомірів досягла похибок 0,01 мм, то еталонні базиси повинні мати на порядок меншу похибка, тобто. мікрометрову. Важливо відзначити, що в даний час лазерних далекомірів і абсолютних інтерферометрів для вимірювання відстаней

порядку 1 км з мікрометровою точністю не існує. Тому створення таких приладів є важливим і актуальним завданням сучасної лазерної дальнометрії.

За останні 10 років з'явилися малогабаритні лазери, що генерують як поодинокі, так і періодичні послідовності потужних фемтосекундних імпульсів. Фемтосекундний імпульс (ФМ) тривалістю $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$ займає в просторі 0,3 мкм. Використання одиночних фемтосекундних імпульсів в стандартних імпульсних далекомірах недоцільно, оскільки не існує електронних вимірювачів часових інтервалів з фемтосекундним тимчасовим дозволом. Відкритим також залишається питання про облік впливу атмосфери на результати світлодалекомірних вимірювань. Тому автором були розроблені схеми, що дозволяють виконувати вимірювання відстаней з використанням періодичних послідовностей фемтосекундних імпульсів з субфемтосекундним тимчасовим дозволом за часом близько 0,5 фс. У лінійній мірі це становить близько 0,15 мкм.

Суть роботи таких далекомірів заснована на тимчасовому збігу опорних і відображених імпульсів в фотоприймачі шляхом затримки опорних імпульсів зі строго контрольованою мікрометровою оптичною лінією з цифровим відліковим пристроєм. З цією метою лазер генерує періодичну послідовність фемтосекундних лазерних імпульсів (ФЛІ) з високостабільною частотою проходження імпульсів 150 МГц. У пропонованому далекомірі за допомогою ОЛЗ в лінійній мірі визначається домер вимірюваної відстані в межах половини довжини хвилі частоти проходження ФМ. Для частоти проходження ФМ 150 МГц половина довжини хвилі складе 1 м. Тимчасового збігу імпульсів домагаються затримкою опорних імпульсів щодо відображених в прецизійній оптичній лінії затримки (ОЛЗ), контрольованої безперервним лазерним інтерферометром. В цьому випадку похибка поєднання ФМ для імпульсу тривалістю 1 фс в лінійній мірі складе близько 0,15 мкм.

1.2.3 Застосування лазерних далекомірів в космонавтиці

Лазерна дальнометрія служить еталоном для калібрування і звірки радіотехнічних систем, синхронізації бортового часу. Високоточна лазерна дальнометрія використовується сьогодні для вирішення величезної кількості завдань, але серед них своєю незмінною актуальністю і широтою застосування виділяється визначення координат нерухомих точок на поверхні Землі (геодезія), а також визначення миттєвих координат і параметрів руху динамічних об'єктів – навігація.

Зараз, завдяки розвитку космічних навігаційно-геодезичних систем, наземні координатні мережі стали будуватися з їх допомогою, і застосована для цього лазерна дальнометрія отримала назву супутникової лазерної дальнометрії (SLR - satellite laser ranging). Так як повсюдно поширена супутникова навігація спирається на геодезію, вимоги до точності навігаційно-геодезичних систем швидко зростають. Особливо жорсткі вимоги пред'являються до лазерної дальнометрії, що служить етальонним і калібрувальним засобом для цих систем.

Якщо в 60-і та 70-і роки досить малою вважалася похибка вимірювань дальності порядку одиниць дециметрів, то з 2000-х років піднімається питання по досягненні точності ± 1 мм. Для вирішення цих проблем в глобальному масштабі створена Міжнародна служба лазерної дальнометрії (ILRS International Laser Ranging Service).

Слід зауважити, що для оптимізації цієї вимірювальної мережі вона повинна бути по можливості рівномірно розподілена по поверхні земної кулі. SLR-станції весь час змінюються – вони стали компактніше, та при цьому точніше колишніх. Досягнена зараз у світовій практиці (в тому числі і у нас) точність вимірювання становить близько 0,5 см і обмежується в основному двома чинниками. Як було констатовано в 2005 році на спеціальній міжнародній нараді в м. Істборн (Великобританія), що мав в назві підзаголовок Towards 1-mm accuracy, тобто "Шлях до точності 1 мм", це –

труднощі точного обліку показника заломлення атмосферного повітря на шляху поширення лазерного променя і так звана "помилка мети". Теоретично існує шлях вирішення даної проблеми – одночасне вимірювання дальності на двох сильно рознесених довжинах хвиль лазерного випромінювання (наприклад у видимому і інфрачервоному ділянках спектра) з використанням рівняння дисперсії – залежності показника заломлення від довжини хвилі. В принципі це дозволяє отримати значення затримки сигналу в атмосфері, не вдаючись до вимірювання температури, тиску і вологості повітря уздовж траси. Однак було показано, що для досягнення таким способом похибки 1 мм в вимірюваній дальності потрібно вимірювати різницю часу поширення для цих двох довжин хвиль з точністю краще $\pm 0,5$ пікосекунди [5] (тобто $\pm 0,07$ мм в перерахунку на дальність). Цього поки не вдається виконати по ряду технічних причин. Другий серйозний обмежувач точності – "помилка мети" – обумовлений тим, що майже всі супутники-мети для високоточних геодезичних і геофізичних вимірювань представляють собою металеві кулі, на поверхні яких встановлено безліч ретрорефлекторів – кутових відбивачів з кварцового скла. Ці сферичні конструкції мають діаметр від 23 см до 2,15 м, а кількість кутових відбивачів на кожному з них становить від 20 до 2142.

В даний час місячною лазерною далекометрією (LLR-Lunar Laser Ranging) займаються всього три станції (дві в США і одна у Франції), які мають відповідне обладнання – потужні короткоімпульсних лазерні передавачі і великі прийомні телескопи. Зараз в трьох точках на Місяці є ретрорефлекторні панелі, доставлені туди астронавтами місій Apollo-11, Apollo-14, Apollo-15, а ще в двох точках – менші за розмірами панелі, встановлені на радянських апаратах "Луноход-1" і "Луноход-2". Але всі ці системи були доставлені на Місяць більше 40 років тому, і ефективність їх знизилася через природні причин (запилення і ерозії поверхні, а можливо і радіаційної деградації). Тобто розвиток систем далекометрії дуже важливий аспект дослідження космосу та космічних явищ.

1.3 Приклади технічної реалізації сучасних далекомірів

Сучасні лазерні імпульсні далекоміри виробляються такими великими закордонними комерційними компаніями, як Bosch, Leica, Zeiss.

Всі вони мають відмінні ергономічні і малогабаритні характеристики, мають широку функціональність (цифрова індикація дальності, режимів роботи, наявності об'єктів в стробі і поза неї, розряду батарей, інтерфейсу зв'язку з персональним комп'ютером, вимірювання швидкості об'єкта) і в основному розрізняються по дальності дії і точності вимірювання в залежності від передбачуваного використання. Основні характеристики деяких лазерних імпульсних далекомірів наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. – Основні характеристики лазерних далекомірів

Модель	Діапазон дальності, яка вимірюється, м	Погрішність вимірювань, м	Довжина хвилі випромінювання, мкм
1Д26	110 – 29995	10,0	1,060
EG-LRF	50 – 25000	5,0	1,540
КТД-2-2	100 – 20000	0,5	1,079
Victory PF 10*56	10 – 1200	1,0	0,904

За даними таблиці можна зробити висновок про те, що до особливостей імпульсних далекомірів можна віднести великі граничні вимірювані дальності (до 30 км), похибкою 0,5 м, а також широке використання приладів з «безпечної» довжиною хвилі 1,54 мкм. При цьому на дальностях до декількох кілометрів в якості випромінювача використовується ППЛ, а на великих відстанях – твердотільний лазер [16].

Практично всі прилади (крім стаціонарних далекомірів військового призначення) мають конструктивне оформлення у вигляді бінокля (рис. 1.5).

При цьому всі прилади оснащені зоровою телескопічною системою для зручності наведення на віддалені об'єкти. Індикація дальності зазвичай представляється в цифровій формі на екрані, оптично зв'язаному з одним з окулярів зорової системи.

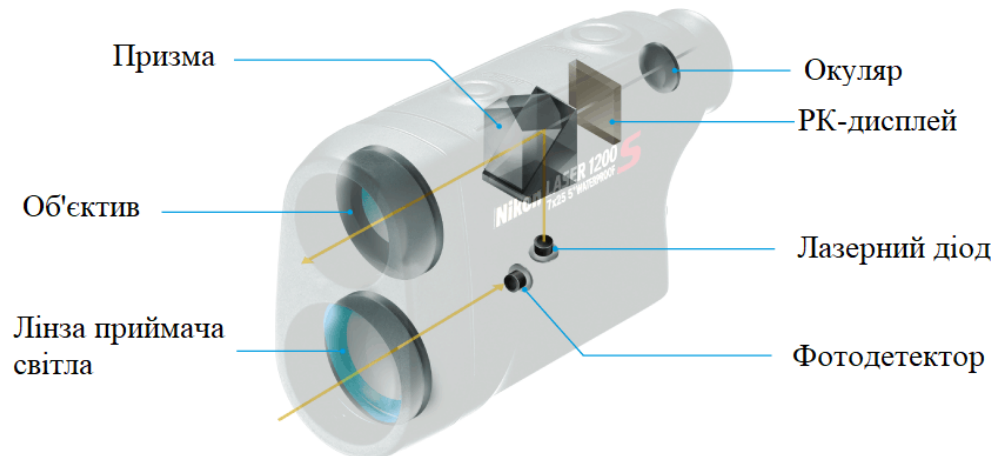


Рисунок 1.5 – Структура типового лазерного далекоміра

Як приклад сучасних лазерних фазових далекомірів можна привести лазерні фазові далекоміри фірм Leica і Bosch. У табл. 1.2 наведені основні параметри далекомірів, які випускаються цими фірмами.

Відзначимо, що при застосуванні уголкового відбивача зазначеного в табл. 1.2 гранична дальність вимірювання зростає в 2 – 2,5 рази. Всі представлені далекоміри мають малі габарити і похибка вимірювання на рівні ± 1 мм.

Таблиця 1.2 – Основні параметри далекомірів

Фірма виробник	Модель	Погрішність вимірювань, м	Дальність вимірювання*, м	Габарити прилада, мм	Маса прилада, г
Leica	D3a	±1	0,05 – 80	125×45×24	110
	D8	±1	0,05 – 200	143×55×30	195
	A8	±1,5	0,05 – 200	148×64×36	270
	DXT	±1,5	0,05 – 70	–	–
Bosch	DLE 70	±1,5	0,05 – 70	100×59×32	180
	DLE 40	±1,5	0,05 – 40	100×58×32	180
*дальність вимірювання по дифузним об'єктам					

Особливістю моделі Leica Disto A5 є наявність обчислювача, що дозволяє вимірювати периметр, площа і об'єм на підставі інформації про дальності. Як правило, в побутових фазових далекомірах використовується ППЛ видимого діапазону (найчастіше 0,6 – 0,68 мкм) для полегшення процесу наведення. Крім того, в прилад вбудований телескопічний візир, що дозволяє здійснювати наведення на об'єкт, який зондується в умовах великої освітленості.

2 РОЗРАХУНОК ПОХИБКИ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЕКОМІРА

2.1 Параметри та точність далекомірів

2.1.1 Фазова і групова швидкості світла

Відомо, що система рівнянь Максвелла, записана для однорідного ізотропного середовища за відсутності струмів і зарядів, дозволяє отримати два рівняння для взаємно перпендикулярних векторів напруженості електричного поля $\bar{E}(\bar{r}, t)$ і індукції магнітного поля $\bar{B}(\bar{r}, t)$:

$$\nabla^2 \bar{E} - \varepsilon \mu \cdot \varepsilon_0 \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (2.1)$$

$$\nabla^2 \bar{B} - \varepsilon \mu \cdot \varepsilon_0 \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t^2} = 0, \quad (2.2)$$

де $\varepsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна постійна;

ε – відносна діелектрична проникність середовища;

μ – відносна магнітна проникність середовища.

Рішення цих рівнянь, які називаються хвильовими рівняннями, описують електромагнітну хвилю, що поширюється в просторі. Так як рівняння (2.1) і (2.2) однакові за формою, в подальшому будемо розглядати лише рівняння (2.1) для вектора $\bar{E} = (\bar{r}, t)$. Нехай, наприклад, компоненти вектора $\bar{E} = (\bar{r}, t)$ залежать тільки від однієї просторової змінної z . Тоді будь-яке рішення рівняння (2.1) може бути представлено у вигляді деякої функції $\bar{\Phi}$, залежної від аргументу $t \pm z / v$:

$$\bar{E}(z, t) = \bar{\Phi}(t \pm z / v), \quad (2.3)$$

$$\text{де, } v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu\varepsilon_0\mu_0}}.$$

Фізична величина v має сенс швидкості поширення електромагнітної хвилі в середовищі, причому знак «мінус» відповідає хвилі, що розповсюджується в позитивному напрямку осі z , знак «плюс» - в негативному напрямку. У разі вакууму ($\varepsilon = \mu = 1$) швидкість поширення [2]:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu\varepsilon_0\mu_0}}. \quad (2.4)$$

Найбільш цікавим видається випадок, коли функція є гармонійною функцією. Запишемо рішення рівняння (2.1) у вигляді плоскої монохроматичної хвилі, що розповсюджується вздовж позитивного напрямку осі z :

$$\bar{E}(z, t) = \bar{E}_0 \cos(\omega(t - z/v) + \varphi) = \bar{E}_0 \cos(\omega t - kz + \varphi), \quad (2.5)$$

де ω – циклічна частота;

$$k = \frac{\omega}{v} \text{ – хвильове число;}$$

$\omega t - kz + \varphi$ – фаза хвилі.

Знайдемо швидкість поверхні постійної фази (або фазову швидкість) уздовж осі z . Для цього продиференціюємо за часом вираз і в підсумку отримаємо:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\omega}{k} = v. \quad (2.6)$$

Таким чином, фізична величина v , що задається формулами (2.3) і (2.6), є фазова швидкість поширення монохроматичної електромагнітної хвилі (рис. 2.1).

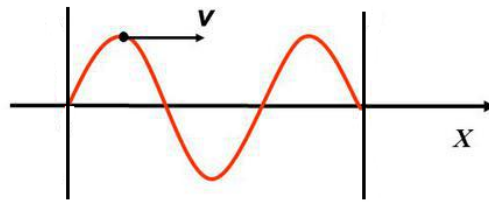


Рисунок 2.1 – Фазова швидкість

З численних експериментів відомо, що в загальному випадку показник заломлення n будь-якого середовища (крім вакууму) залежить від частоти ω поширюється в середовищі світла, тобто середовище характеризується дисперсією. Отже, фазова швидкість також залежить від частоти. Як відомо, ідеальної монохроматичної хвилі з частотою ω не існує в природі, так як така хвиля повинна була б бути нескінченно протяжною і просторі, і в часі. За допомогою такої хвилі, якби вона й існувала, неможлива передача інформації – відбувається тільки перенесення енергії. Тому для передачі інформації використовуються світлові імпульси обмеженої тривалості, які можна представити у вигляді інтеграла Фур'є, тобто у вигляді суми нескінченного числа монохроматичних складових. Часто світлові імпульси називають хвильовими пакетами. При поширенні такого світлового імпульсу в середовищі з дисперсією відбувається його деформація, або «розпливання» хвильового пакета. Якщо середовище має сильну дисперсію, то форма імпульсу може змінитися істотно. Якщо ж дисперсія невелика, то про швидкість поширення імпульсу можна говорити як про швидкість поширення будь-якої його точки, наприклад, максимуму його амплітуди. Таку швидкість зазвичай називають груповою швидкістю, яку можна уявити, як показано на рис. 2.2.

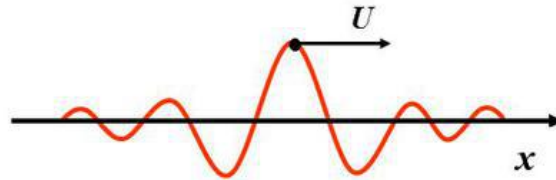


Рисунок 2.2 – Групова швидкість

Щоб знайти вираз для групової швидкості, розглянемо поширення в середовищі з дисперсією двох монохроматичних хвиль з однаковими амплітудами і близькими частотами ω_1 и ω_2 :

$$\bar{E}_1(z, t) = \bar{E}_0 \cos(\omega_1 t - k_1 z), \quad (2.7)$$

$$\bar{E}_2(z, t) = \bar{E}_0 \cos(\omega_2 t - k_2 z). \quad (2.8)$$

Тоді для результуючої хвилі отримаємо:

$$\bar{E}(z, t) = \bar{E}_1(z, t) + \bar{E}_2(z, t) = 2\bar{E}_0 \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}z\right) \cdot \cos(\omega t - kz), \quad (2.9)$$

де $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \ll \omega_1, \omega_2$;

$\Delta k = k_1 - k_2 \ll k_1, k_2$;

$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \gg \Delta\omega$;

$k = \frac{k_1 + k_2}{2} \gg \Delta k$.

Цю хвилю можна представити як гармонійну хвилю з повільно мінливою «амплітудою»

$$\bar{A}(z, t) = \bar{E}_0 \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}z\right). \quad (2.10)$$

Тоді швидкість поширення максимуму «амплітуди», або групову швидкість v , можна знайти диференціюючи по t вираз, що стоїть під знаком косинуса:

$$v = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}, \quad (2.11)$$

або в межі

$$v = \frac{\partial\omega}{\partial k}. \quad (2.12)$$

Зі співвідношень (2.6) і (2.12) можна знайти зв'язок між фазними і груповими швидкостями:

$$v = \frac{\partial\omega}{\partial k} = \frac{\partial(kv)}{\partial k} = v + k \frac{\partial v}{\partial k}. \quad (2.13)$$

Так як $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ и $\partial k = \frac{2\pi}{\lambda^2} \partial\lambda$, то формулу (2.13) представимо у вигляді формули Релея:

$$v = v + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial v}{(-2\pi \cdot \partial\lambda)} \lambda^2 = v - \lambda \frac{\partial v}{\partial \lambda}, \quad (2.14)$$

Формула (2.12) для групової швидкості була отримана за умови, що хвильовий пакет складався з двох монохроматичних складових. Реально хвильовий пакет є сукупністю цілого набору довжин хвиль шириною $\Delta\lambda$ (або $|\Delta k| = \frac{2\pi}{\lambda^2} \Delta\lambda = \frac{k}{\lambda} \Delta\lambda$). З формул (2.13) – (2.14) можна помітити, що групова швидкість u є постійною для хвильового пакета тільки за умови, що величина $\frac{\partial v}{\partial \lambda}$ (або $\frac{\partial v}{\partial k}$) залишається незмінною для всього діапазону довжин хвиль даного хвильового пакета. Тільки в цьому випадку групова швидкість є адекватною характеристикою поширення хвильового пакета в диспергуючому

середовищі і світловий імпульс буде поширюватися, слабо змінюючи свою форму.

2.1.2 Фізичне поняття показника заломлення атмосфери

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 [3]. 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 2.1

Таблиця 2.1 – Показник заломлення речовин.

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

У класичної електронної 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:

$$\ddot{\vec{r}} + 2\gamma\dot{\vec{r}} + \omega_0^2\vec{r} = -\frac{e}{m}\vec{E}_0e^{-i\omega t}, \quad (2.15)$$

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 [4]. 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 (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). 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 [3]:

$$\Phi = (n-1) \frac{2\pi}{\lambda} L. \quad (2.16)$$

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

$$v = \frac{c}{n}. \quad (2.17)$$

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

$$n_f = \frac{c}{v_f}. \quad (2.18)$$

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

$$n_g = \frac{c}{v_g}. \quad (2.19)$$

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.

2.1.3 Вплив точності визначення показника заломлення

Типова структурна схема роботи лазерної далекомірної системи, наприклад, для вимірювання відстані до луни, наступна: сформований передавальною оптичною системою вихідний імпульсний сигнал випромінюється в напрямку вимірювача часових інтервалів. Невелика частина цього сигналу надходить на вхід стартового фотоприймача з граничним пристроєм, що запускає вимірювач часових інтервалів (ВЧІ). Відбитий луна-сигнал, що надійшов до приймальної оптичної системи зупиняє лічильник часу. Точно виміряний часовий інтервал проходження лазерного імпульсу до штучного супутника землі назад надходить в обчислювальний пристрій спільно з інформацією про параметри атмосфери (температура, тиск, вологість), виміряних на трасі лазерного сигналу.

Відстань до ВЧІ обчислюється зі співвідношення:

$$L = c\tau / 2\tilde{n} + \delta L, \quad (2.20)$$

де c – швидкість світла,

τ – час проходження імпульсу до ВЧІ і назад,

\tilde{n} – середній показник заломлення атмосфери уздовж траєкторії лазерного променя:

$$\tilde{n} = (1 / z) \cdot (z \, n \, dl), \quad (2.21)$$

де l – променева траєкторія,

n – поточне значення показника заломлення повітря,

z – довжина траєкторії,

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

Траєкторія лазерного променя викривляється і відрізняється від геометрично прямої 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.

Звідси видно, що найбільш важливими факторами точності вимірювань є: точність вимірювання часу τ поширення сигналу, точність визначення n і поправки δL .

2.1.4 Фактори, які впливають на точність далекомірів

Сучасні лазерні далекоміри в більшості випадків компактні і дозволяють в найкоротші терміни і з великою точністю визначити відстані до об'єктів, що цікавлять. Для вирішення різних завдань застосовуються різні типи далекомірів, але, як не різнилися сфери застосування, всіх їх об'єднує одне - необхідність в точному визначенні відстані. Можна, можливо відзначити що помилки, які призводять до неточності у визначенні відстані при вирішенні різних завдань, в більшості своїй, однакові. Але методи, які застосовуються для їх виправлення, найчастіше, мають великі відмінності [14].

В основі лазерної локації, так само як і в радіолокації лежать три основні властивості електромагнітних хвиль.

1. Здатність відбиватися від об'єктів. Ціль та фон, на якому вона розташована, по-різному відображають впало на них випромінювання. Лазерне випромінювання відбивається від всіх предметів: металевих і неметалевих, від лісу, води. Більш того, воно відбивається від будь-яких об'єктів, розміри яких менше довжини хвилі, краще, ніж радіохвилі. Це добре

відомо з основної закономірності відображення, по якій слід, що чим коротше довжина хвилі, тим краще вона відбивається. Потужність відбитого в цьому випадку випромінювання обернено пропорційна довжині хвилі. Лазерному локатору принципово притаманна і велика виявляючі здатність, ніж радіолокаторам – чим коротше хвиля, тим вона вища, чим пояснюється в міру розвитку радіолокації тенденція до переходу від довгих хвиль до більш коротким. Однак виготовлення генераторів радіодіапазону, випромінюючих понад короткі радіохвилі ставало все важче і важче, а потім зовсім зайшло в глухий кут. Створення лазерів відкрило нові перспективи в техніці локації.

2. Здатність поширюватися прямолінійно. Використання вузьконаправленого лазерного променя, яким проводиться перегляд простору, дозволяє визначити напрямок на об'єкт (пеленг цілі). Цей напрямок знаходять розміщенням осі оптичної системи, що формує лазерне випромінювання. Чим вужче промінь, тим з більшою точністю може бути визначена відстань. Прості розрахунки показують: щоб отримати коефіцієнт спрямованості близько 1,5 при використанні радіохвиль сантиметрового діапазону, потрібно мати антену діаметром близько 10м. Таку антену важко поставити на танк, наприклад, а тим більше на літальний апарат. Вона громіздка і нетранспортабельна. Потрібно використовувати більш короткі хвилі.

3. Здатність лазерного випромінювання поширюватися з постійної швидкістю дає можливість визначати дальність до об'єкта. Так, при імпульсному методі далекометрії використовується наступне співвідношення:

$$L = ct, \quad (2.22)$$

де L – відстань до об'єкта,

c – швидкість поширення випромінювання,

t – час проходження імпульсу до цілі і назад.

Розгляд цього співвідношення показує, що потенційна точність виміру дальності визначається точністю вимірювання часу проходження імпульсу енергії до об'єкта і назад. Абсолютно ясно, що чим коротше імпульс, тим краще.

Відомо з практики, граничні дистанції роботи далекомірів, заявлені виробниками, носять умовний характер. Якість і можливість проведення заміру залежать від дуже багатьох факторів, які можна розділити на позитивні і негативні. Максимальні результати досягаються тільки при наявності всіх позитивних факторів [14].

1. Позитивні фактори: великий об'єкт; поверхня об'єкта рівна і щільна, поверхня плоска, поверхня розташована перпендикулярно до лінії виміру (променю лазера), поверхня світла – в ідеалі біла, але не дзеркальна. Атмосфера прозора, немає опадів, немає ясного сонця, на шляху променя немає сторонніх предметів. Далекомір зафіксовано – в ідеалі на штативі, лінзи далекоміра чисті, елементи живлення заряджені.

2. Негативні фактори: дрібний об'єкт; поверхня нерівна, пухка, кут виміру значно відрізняється від прямого, поверхня темна – гірше всього чорна. Дзеркала настільки точно відображають промінь, що він залишається вузьконаправленим і залишається поза увагою приймача. Туман, пил, дощ, сніг, яскраве сонце. Далекомір тремтить в руці, лінзи забруднені, батарейка розряджена.

Ці чинники однаково впливають на будь-які лазерні далекоміри, будь-яких виробників, тому багато розробляють спеціальні режими, щоб обійти негативні фактори, але повністю їх впливу уникнути не вдається. Найбільшою результативності лазерний далекомір домагається за програмними цілями, володіє максимальним відбиваючим ефектом. Чим сильніше висвітлена поверхня візування, тим гірше видно «точку» від променя. Це просто означає, що «сигнал», який повинен обробити далекомір, слабкий. Заявлені точність і дальність в таких умовах, як мінімум, не гарантовані. У сонячну погоду ефективність роботи лазера знижується, а в темряві збільшується. Вночі

далекоміри без всяких додаткових пристосувань здатні визначати порівняно великі відстані. Ідеальним середовищем для лазерного променя служить прозоре повітря. Якщо ж на вулиці туман або пилова, то сигнал також буде слабшати. У ряді приладів передбачений режим "дощ" дозволяє ігнорувати такі "помилкові цілі". Нестійке положення далекоміра так само впливає на точність вимірювання. Утримуючи прилад в руках, великі дистанції виміряти навряд чи вдасться (пристрій видасть помилку «поза діапазону вимірювань»). У таких випадках знадобиться штатив. Досить важливо і властивості поверхні візування. Наприклад, темні і шорсткі покриття добре поглинають випромінювання. Також робота далекоміра залежить від якості батарейок – на "посаджених" джерелах живлення лазер не зможе дати потрібний імпульс.

З усього вищесказаного можна зробити висновок: за рахунок використання лазерних далекомірів і вдосконалення їх функціональності, істотно розширяється можливість приладу, що в свою чергу сприяє більш якісному виконанню різних завдань.

2.2 Лазери, які використовуються в далекометрії

2.2.1 Фемтосекундний лазерний далекомір

Фемтосекундний лазерний далекомір містить лазерний випромінювач, приймальний і передавальний оптичні канали, оптичну регульовану лінію затримки з індикатором величини затримки, фотоприймач. Лазерний випромінювач виконаний у вигляді джерела одиночних фемтосекундних імпульсів, випромінювання з якого надходить в рециркулятор, з виходу якого основна частина випромінювання надходить в передавальний оптичний канал, а інша частина – в оптичну регульовану лінію затримки, також додатково містить надшвидкодійний перемикач, на вхід якого надходять вимірювальні імпульси з приймального оптичного каналу і оптичної регульованої лінії затримки, з виходу надшвидкодійного перемикача вимірювальні імпульси поступають в фотоприймач, вихід якого з'єднаний пристроєм управління

оптичної лінією затримки. Технічний результат – підвищення інструментальної точності вимірювання дальності 1 м.

Пропонований пристрій відноситься до лазерної дальнометрії і може бути використаний для вимірювання відстаней з точністю, близькою до точності вимірювання лазерним інтерферометром, зокрема, при проведенні метрологічних робіт, для високоточних геодезичних вимірювань, вимірювань переміщень земної кори в місцях її природних розломів і ряді інших. За точністю пропонований далекомір відноситься до оптичних інтерферометрів для вимірювання відстаней до кілометра з інструментальною похибкою кілька мікрометрів.

Відомий імпульсний далекомір [11], який дозволяє підвищити точність вимірювання відстаней за рахунок урахування впливу атмосфери, що містить: лазерний випромінювач з нелінійним кристалом, який генерує імпульси пікосекундної тривалості на двох довжинах хвиль, фотоприймачі, що сприймають імпульси на двох довжинах хвиль після проходження вимірюваної відстані, дві автоматично керовані оптичні лінії затримки, одна для вимірювання лінійного домера дальності, інша для визначення різниці ходу променів першої та другої гармонік оптичного випромінювання при проходженні вимірюваного відстані, оптичний затвор на основі осередку Керра.

Відомий імпульсний лазерний світлодалекомір, взятий в якості прототипу, який містить пікосекундний лазер з активною синхронізацією мод, що генерує послідовність пікосекундних імпульсів, що посилюються на дистанцію. Частина випромінювання лазера надходить в керовану лінію затримки опорного каналу. Прийняті з дистанції і опорні імпульси поєднуються в загальний пучок і надходять на параметричний підсилювач, що дозволяє одночасно посилювати і здійснювати індикацію тимчасового збігу дистанційних і опорних імпульсів [15].

Недоліком відомих пристроїв є невисока точність, співмірна з точністю сучасних фазових світлодалекомірів, яка визначається швидкодією оптичного

затвора на основі осередку Керра, з часом релаксації порядку 10^{-12} с і не дозволяє використовувати фемтосекундні імпульси тривалістю близько 10^{-15} с. Завданням винаходу є підвищення інструментальної точності вимірювання дальності.

Поставлена задача досягається тим, що в фемтосекундному лазерному далекомірі, який містить лазерний випромінювач, приймальний і передавальний оптичні канали, оптичну регульовану лінію затримки з індикатором величини затримки, фотоприймач, лазерний випромінювач, що виконаний у вигляді джерела одиночних фемтосекундних імпульсів, випромінювання з якого надходить в рециркулятор, з виходу якого основна частина випромінювання надходить в передавальний оптичний канал, а інша частина – в оптичну регульовану лінію затримки. Щоб отримати додаткову містить надшвидкодіючих перемикач з часом перемикання порядку 10^{-15} с, на вхід якого надходять вимірювальні імпульси з приймального оптичного каналу і оптичної регульованою лінії затримки, з виходу надшвидкодіючих перемикача вимірювальні імпульси надходять в фотоприймач, вихід якого з'єднаний з пристроєм управління оптичною лінією затримки. Пристрій дозволяє точніше фіксувати момент збігу опорних оптичних імпульсів і імпульсів, що прийшли з дистанції [15].

У відомому рівні техніки не виявлено аналогічних технічних рішень, призначених для збільшення точності вимірювання дальності та містять фемтосекундний випромінювач, рециркулятор, надшвидкодіючих оптичний перемикач (МПДМП-структури).

На рисунку 2.3 зображена схема фемтосекундного далекоміра, до складу якої входять: 1 – джерело одиночних фемтосекундних імпульсів; 8 – рециркулятор з оптичним квантовим підсилювачем 2 і поглиначем оптичного випромінювання 3, 7; 5 – оптична лінія затримки з пристроєм управління 4 і індикації 16; 6 – система сервоуправління; 9 – світлодільна призма; 10 – фотоприймач; 11 – світло дільник; 12 – надшвидкодіючий

оптичний перемикач; 13 і 14 – приймальний і передавальний оптичні канали, 15 – відбивач.

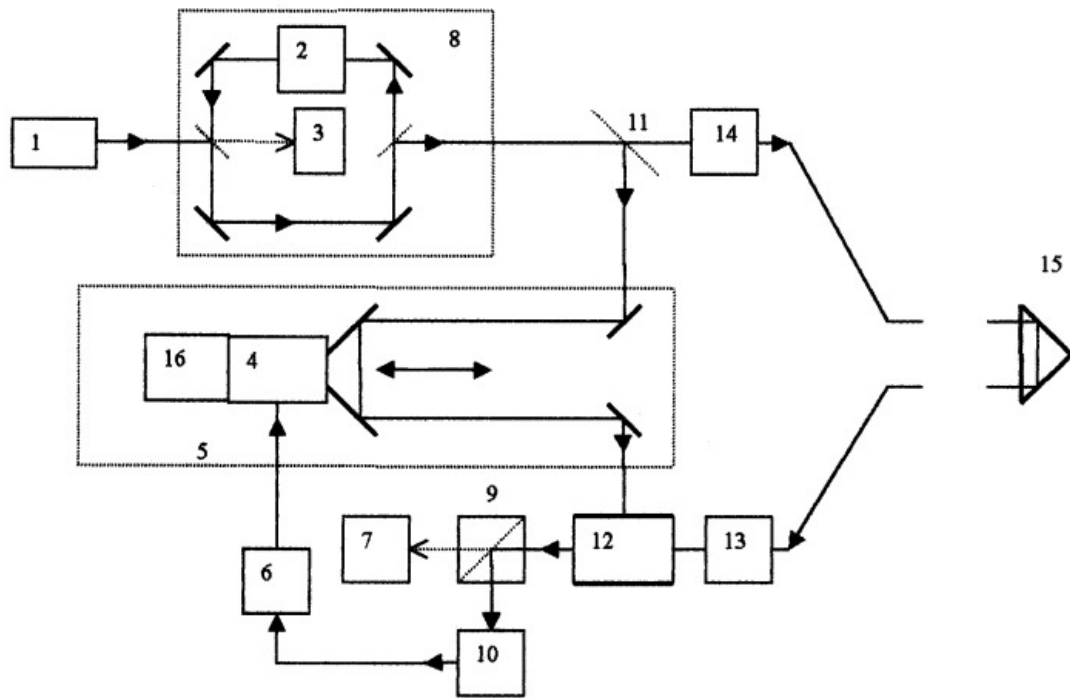


Рисунок 2.3 – Схема фемтосекундного лазерного далекоміру

Фемтосекундний світлодалекомір працює наступним чином. Фемтосекундний лазер одиночного імпульсу (ФЛОІ) випромінює імпульс з потужністю $\Phi \sim 10^{10}$ Вт і тривалістю кілька фемтосекунд. Для створення періодичної послідовності потужних лазерних імпульсів з частотою f близько 150 МГц і стабільністю проходження імпульсів до 10^{-8} с випромінювання ФЛОІ надходить в рециркулятор 8 [6]. У ній одиночний імпульс, проходячи кожен раз в кільцевому резонаторі з оптичним квантовим підсилювачем 2, виводиться напівпрозорим дзеркалом на дистанцію з відносною стабільністю порядку. Невелика частина випромінювання надходить в оптичну регульовану лінію затримки опорного каналу. Основна частина періодичної послідовності лазерного випромінювання за допомогою передавального оптичного каналу 14 направляється на віддалений відбивач 15. Вимірвальні імпульси з приймального оптичного каналу 13 і опорні з оптичної лінії затримки 5

надходять в надшвидкодійний оптичний перемикач 12. У разі збігу опорних і вимірювальних імпульсів опорний імпульс, що поглинається в напівпровіднику, впливає на структуру з боку електрода, прилеглого до р-п-переходу, і викликає перекидання електричного поля, яке повертає площину поляризації випромінювання, що приймається. Далі з виходу перемикача вимірювальні імпульси за допомогою світлодільної призми 9 направляються в фотоприймач 10, який зупиняє систему сервоуправління 6 пристроєм управління 4, мікрометричною зрушення ОЛЗ, сполученого з пристроєм індикації 16. Відлік по індикатору датчика переміщень відповідає величині L . Цифрами 3, 7 позначені поглиначі оптичного випромінювання. Суть роботи світлодалекоміра полягає у фіксації тимчасового збігу опорних і вимірювальних імпульсів, що пройшли подвійну вимірювану відстань D , в надшвидкодійному комутаторі за відліком в автоматично регульованій оптичній лінії затримки (ОЛЗ) в опорному каналі. Це дає можливість визначати відстань за формулою

$$D = \frac{V}{2}(NT + \tau) = \frac{\lambda}{2}N + L, \quad (2.23)$$

де V – швидкість поширення ЕМВ в атмосфері;

T – період проходження імпульсів;

$\lambda / 2$ – половина довжини хвилі, що відповідає періоду T ($f = 150 \text{ МГц} / 2 = 1 \text{ м}$);

N – ціле число періодів, що укладаються за часом в відстані $2D$;

τ – домен тимчасового інтервалу ($0 \ll T$), що відповідає періоду T ;

L – точно вимірюваний домен, що виражає величину в лінійній мірі.

Визначення числа N , відповідного цілому числу метрів в обумовленому відстані, можна виконати будь-яким іншим методом, включаючи використання фазових або імпульсних далекомірів. Для врахування впливу

атмосфери в далекомірі може бути використаний дисперсійний метод, реалізований в приладі.

2.2.2 Двох/трьох частотні лазерні далекоміри

Двохчастотні лазерні далекоміри широко застосовується в інженерній геодезії, при топографічній зйомці, у військовій справі, в навігації, в астрономічних дослідженнях, у фотографії.

На рис. 2.4 представлена функціональна схема двухчастотного лазерного фазового далекоміра, що реалізує класичний принцип дії. 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 детектори в якості опорних напруг.

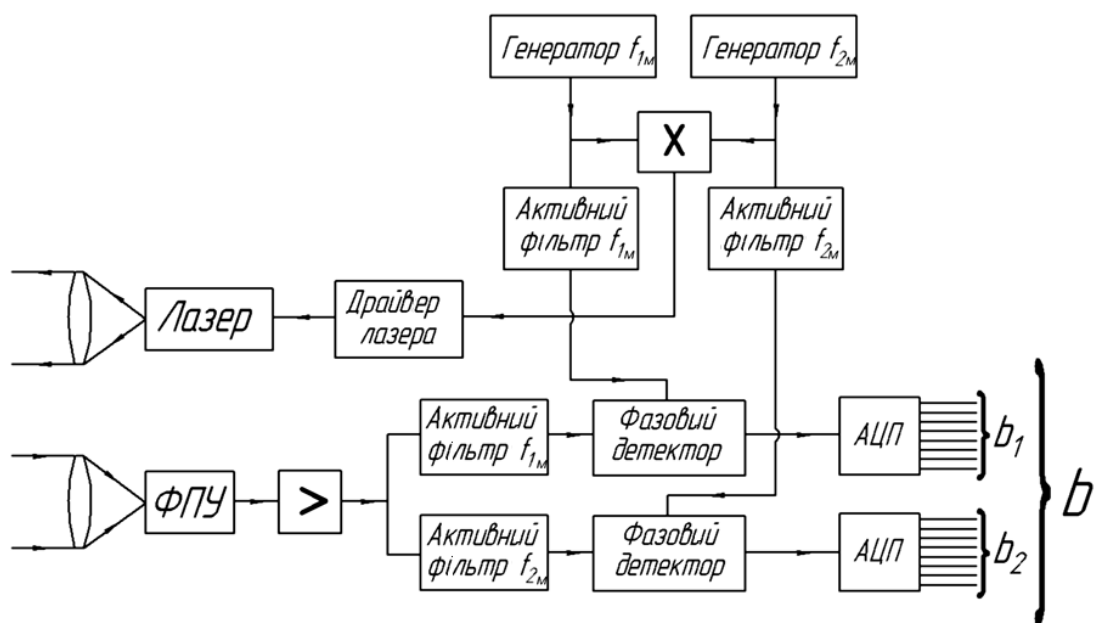


Рисунок 2.4 – Функціональна схема лазерного фазового далекоміра

Після відбиття від об'єкта, який зондується одночасно двома частотами лазерне випромінювання зі зміненою фазою реєструється ФПУ. Напряга з виходу ФПУ посилюється ширококутовим 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.

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 двоїчних числа b_1 і b_2 . Перше число є грубо певною дальністю, а друге число – уточненням дальності до значення необхідної похибки. Для отримання підсумкового результату чисел 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).

Багатоцільова лазерна локаційна система (ЛЛС) для космічних апаратів була розроблена фірмою ІТТ (США). Одночасна робота такої ЛЛС з кількома цілями дозволяє визначати відносну орієнтацію космічного апарату, для чого на цілі в певному порядку встановлюються чотири оптичних кутових відбивача, кутові координати і дальність яких вимірює ЛЛС і за цими даними обчислює кути орієнтації мети щодо активного космічного апарату. Помилка визначення орієнтації мети не перевищує 1° .

Для визначення дальності до цілі в ЛЛС використовується метод тимчасової затримки з роздільною здатністю за часом 0,67 нс (1499 МГц), що відповідає роздільній здатності по дальності 10 см. Таке високе тимчасове рішення забезпечувалося надшвидкодійними логічними мікросхемами, а також спеціальною схемою множення частоти на основі полоскових ліній затримки. Структурна схема пристрою виміру дальності приведена на рис. 2.5.

До складу схеми входять: 1 – еталонний генератор; 2 – лічильник-дільник на 1000; 3 – пристрій підстроювання частоти; 4 – лазерний передавач; 5 – фотодіод; 6 – головний генератор (частота 187,376 МГц); 7 – фотоприймач; 8 – лічильник-дільник на 8; 9 – точний вимірювач дальності (частота

1499 МГц); 10 – лічильник-дільник частоти; 11 – грубий вимірник дальності; 12 – реєстр коду дальності; 13 – генератор імпульсу дальності; 14 – реєстри кодів цілей.

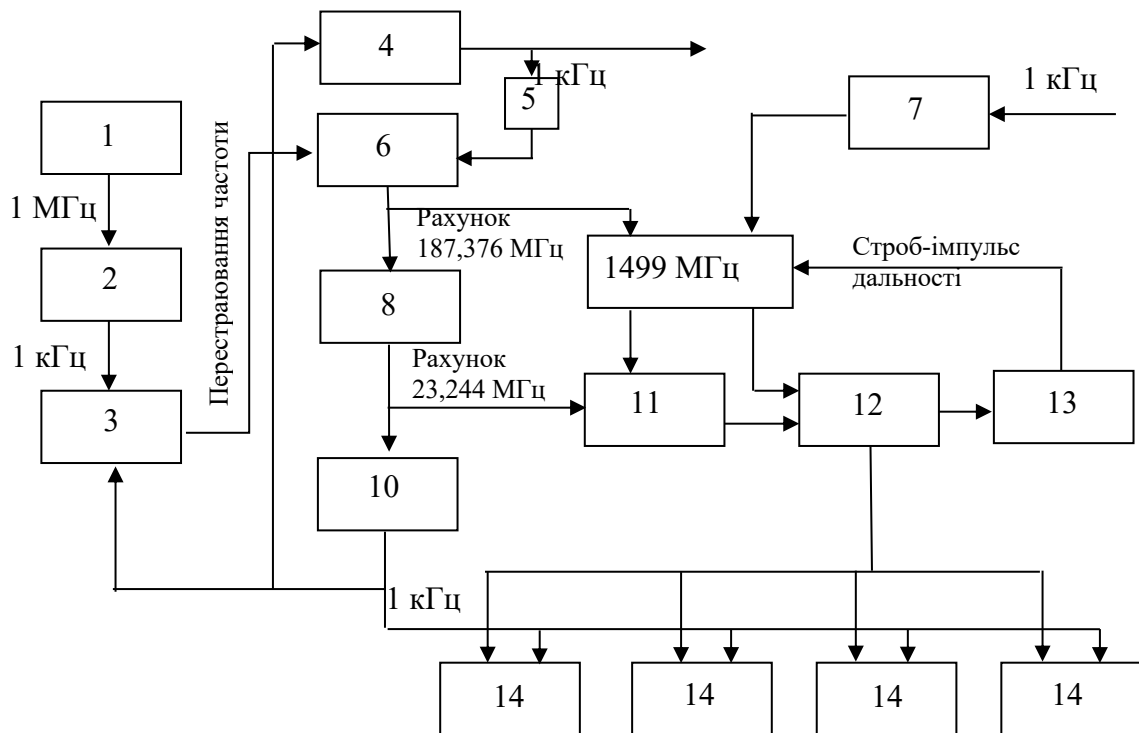


Рисунок 2.5 – Структурна схема ЛЛС

Структурна схема пристрою виміру дальності включає лазерний передавач 4, який генерує імпульси випромінювання з частотою проходження 1кГц. Частина випромінювання відгалужується на фотодіод 5, вихідний імпульс якого запускає головний генератор 6, який працює на частоти 187,376 МГц. Одночасно починає працювати точний вимірювач дальності 9, що вимірює не повну дальність до цілі, а тільки поправку до відліку грубого вимірювача дальності 11, що працює на частоти 23,422 МГц.

Для підвищення перешкодозахищеності в момент очікуваного приходу лазерного локаційного сигналу від обраної мети генератором 13 формує імпульс дальності. Для забезпечення необхідної стабільності частоти головного генератора 6 застосовується схема фазової підстройки частоти, в якій високостабільний еталонний генератор 1 забезпечує стабільність частоти

1 МГц з точністю до 1 кГц. Сигнал з виходу головного генератора надходить на лічильник-дільник 2, на виході якого частота знижується до 1 кГц. На цій частоті фази еталонного генератора 1 і головного генератора 6 порівнюються пристроєм підстроювання частоти 3, вихідний сигнал якого підлаштовує частоту головного генератора, забезпечуючи її стабільність

Одним з цікавих прикладів застосування ЛЛС є використання унікального лазерного локатора, призначеного для імпульсної локації Місяця (точніше кутових відбивачів на поверхні Місяця).

2.3 Оцінка похибки лазерного далекоміра

Дальнометрія земної і морської поверхні є одним з найбільш перспективних методів дистанційного зондування. Супутникова дальнометрія морської поверхні дозволяє отримати картину топографії океану, яка дає можливість якісно і кількісно судити про припливи, течії, вихори і вітрові нагони [11 – 16].

При використанні та засвоєнні даних супутникового висотомірів (далекомірів) важливе значення має питання про точність вимірювань. Похибки дальнометричних вимірювань з штучних супутників Землі (ШСЗ) викликані змінами параметрів орбіти ШСЗ, похибками їх визначення і похибками вимірювань самого далекомір. Потенційно високу точність вимірювань здатні забезпечити лазерні далекоміри.

2.3.1 Постановка завдання

Для зменшення помилок, обумовлених зміною параметрів орбіти ШСЗ і похибками їх визначення, перспективно використання многопроміневої схеми лазерного зондування.

Схема вимірювання нахилів поверхні рівня за допомогою двопроміневого лазерного далекоміра показана на рис. 2.6.

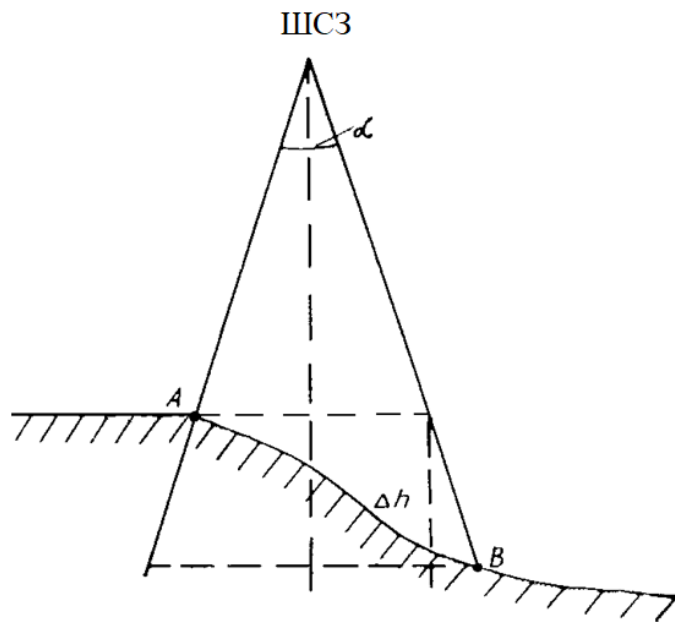


Рисунок 2.6 – Схема вимірювання нахилів поверхні рівня за допомогою двопроменевого лазерного висотоміра

Застосування двопроменевої схеми дозволяє отримати різницю дальностей до точок А і В, а значить і різницю висот рівної поверхні в точках А і В. Визначення різниці рівнів при цьому практично не буде залежати від зміни параметрів орбіти ШСЗ і точності їх визначення. Якщо розташувати промені в площині орбіти, то можна отримати картину нахилів поверхні рівня уздовж траєкторії польоту ШСЗ.

Застосування трипроменевого далекоміру (третьої промінь в площині, перпендикулярній площині орбіти) дає можливість отримати просторовий розподіл нахилів рівня по трасі польоту.

У атестаційній роботі проводиться оцінка точності вимірювань перепадів висот морської поверхні за допомогою лазерного далекоміра, встановленого на ШСЗ, в умовах вітрового хвилювання і покриття морської поверхні піною. Таке завдання становить практичний інтерес для вимірювання нахилів рівня океану з ШСЗ і раніше в умовах вітрового хвилювання і покриття морської поверхні піною не розглядалися.

2.3.2 Середня затримка лазерного луна-імпульсу від морської поверхні

Довжина трас зондування на ділянках ОА і ОВ може бути визначена по затримці лазерних луна-імпульсів, що реєструються приймачем лідара. Визначимо затримку лазерного луна-імпульсу T (щодо послілки зондуючого імпульсу) наступним чином [17]:

$$T = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} tP(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} P(t) dt} \quad (2.23)$$

де $P(t)$ - потужність лазерного луна-сигналу, що реєструється приймачем лідара.

Для оцінки величини T використовуємо отримані в [17] формули для середнього (за багато імпульсів) значення затримки лазерного луна-сигналу від локально-дзеркальної поверхні (для ділянок морської поверхні без піни) і локально-ламбертовської поверхні (для ділянок морської поверхні, покритих піною).

У разі похилого моностатического зондування морської поверхні вираз для T має вигляд:

$$T = T_s K_s + T_f (1 - K_s) \quad (2.24)$$

де

$$T_s \cong \frac{2L}{c} - \frac{2L}{c} \operatorname{tg}^2 \theta \frac{1 + 2\sigma^2 (C_s + C_r)}{1 + 2\sigma^2 \sin^2 \theta (C_s + C_r) + 2L^2 \gamma_x^2 (C_s + C_r)} + \frac{1}{2cL} \left[\frac{1}{1 / (2L^2 \gamma_y^2 \cos^2 \theta) + C_s + C_r} + \frac{1}{\cos^{-2} \theta / (2L^2 \gamma_x^2) + C_s + C_r} \right], \quad (2.25)$$

$$T_f \cong \frac{2L}{c} + \frac{1}{2cL(C_s + C_r)} \left[1 + \cos^{-2} \theta (1 + 2\sigma^2 (C_s + C_r) \sin^2 \theta) \right], \quad (2.26)$$

$$K_s \cong \left\{ 1 + \frac{8S_f A_f Q (\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2} \cos^4 \theta}{(1 - S_f) V^2} \exp\left(\frac{tg^2 \theta}{2\gamma_x^2}\right) \right\}^{-1}, \quad (2.27)$$

T_s, T_f - затримка лазерного луна-імпульсу при зондуванні морської поверхні без піни і морської поверхні, суцільно вкритою піною;

$\sigma^2, \gamma_{x,y}^2$ - дисперсія висот і дисперсія нахилів вітрового хвилювання морської поверхні в площині зондування і в напрямку перпендикулярному площині зондування;

θ - кут зондування, відлічуваний від вертикалі;

L - похиле відстань від лідара до центру освітленого лазерного плями на морській поверхні;

V^2 - коефіцієнт Френеля для плоскої морської поверхні при вертикальному зондуванні;

S_f - частка поверхні моря, покритої піною;

A_f - альbedo елементарної ділянки морської поверхні, покритої піною;

Для слабоанізотропного хвилювання: $Q \approx \frac{a \cos^2 \theta}{2(\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2}}; a = 4\left(\frac{1}{\gamma_x^2} + \frac{1}{\gamma_y^2}\right)^{-1}$.

Величини $C_{s,r}$ в загальному випадку залежать від параметрів джерела і приймача лідара і стану земної атмосфери. Для прозорої земної атмосфери $C_{s,r} = (\alpha_{s,r} L)^{-2}$, $\alpha_{s,r}$ - кут розходження джерела і кут поля зору приймача оптичної системи лідара.

При отриманні наведених вище формул щільність розподілу висот і нахилів морської поверхні і діаграми джерела і приймача лідара вважалися гауссовськими, і вважалося, що $tg^2 \theta \gg \gamma_{x,y}^2 \gg L^{-2} (C_s + C_r)^{-1}$, (Ці умови легко виконуються при похилому лазерному зондуванні морської поверхні для $\theta \geq 5^\circ$). Для піни (яка з'являється при великих значеннях швидкості

приводного вітру) використовувалася модель випадково-нерівної локально-ламбертовської поверхні, розподіл нахилів якої збігається з розподілом нахилів морських хвиль.

Формула (2.24) дає оцінку для середньої (по серії зондуючих імпульсів) затримки лазерного луна-імпульсу від морської поверхні як при невеликих швидкостях приводного вітру (коли піни ще немає), так і при великих швидкостях приводного вітру (коли на поверхні моря з'являється піна). При цьому, по-перше, обсяг вибірки, по якій проводиться усереднення, повинен бути достатнім, щоб вибіркоче середнє значення з прийнятною точністю характеризувало середнє значення вимірюваної величини, і, по-друге, всі імпульси з вибірки, по якій проводиться усереднення, повинні потрапляти на невеликий (в порівнянні з відстанню між точками А і В) ділянку морської поверхні. Характеристики сучасних бортових лідарів [8] дозволяють забезпечити такий обсяг вибірки.

2.3.3 Визначення значення перепаду висот морської поверхні

Використовуючи формулу (2.24), отримаємо для геометрії зондування, показаної на рис. 2.6, вираз для $\Delta h_m = 0,5(T_1 + T_2)c \cdot \cos \theta$ - перепаду висот в точках А і В, вимірюваного по різниці затримок лазерних луна-імпульсів, що реєструються приймачем лідара (T_1, T_2 - затримки лазерного луна-імпульсів для двох променів схеми зондування):

$$\Delta h_m \cong \Delta h + \Delta h_1 - H(K_{s_2} - K_{s_1})tg^2 \alpha - H\mu(K_{s_2} - K_{s_1})tg \alpha, \quad (2.28)$$

$$\text{де: } \mu = 2\beta(1 + tg^2 \alpha); \nu = \alpha_s^{-2} + \alpha_r^{-2};$$

$$K_{s_{1,2}} \cong K_{1,2} \left\{ 1 + \frac{8S_{f_{1,2}}A_f Q(\gamma_{x_{1,2}}^2 \gamma_{y_{1,2}}^2)^{1/2} \cos^4 \alpha}{(1 - S_{1,2f})V^2} \exp\left(\frac{tg^2 \alpha}{2\gamma_{x_{1,2}}^2}\right) \right\}^{-1};$$

$$K_{1,2} = (1 + 2\nu\gamma_{x_{1,2}}^2)^{-1};$$

$$\Delta h = (L_2 - L_1) \cos \alpha;$$

$$\Delta h_1 = 0,25(L_2 - L_1) \cos \alpha (1 + \cos^{-2} \alpha) / \nu;$$

Δh - геометрична різниця рівнів в точках А і В;

H - висота ШСЗ над морською поверхнею;

$\gamma_{x1,y1}^2, \gamma_{x2,y2}^2$ - дисперсії нахилів морської поверхні в точках А і В;

2α - кут між оптичними осями лазерних пучків в схемі зондування;

β - нахил рівної поверхні.

При отриманні формули (2.28) враховувалося, що $\beta \ll 1$ і вважалося, що розмір освітленого лазерного плями на морській поверхні багато більше середньоквадратичного значення висот морської поверхні (ця умова легко виконується при зондуванні морської поверхні з авіаційних і космічних апаратів).

З формули (2.28) видно, що величина Δh_m , яка вимірюється по різниці затримок лазерних луна-імпульсів, відрізняється від Δh - геометричній різниці висот рівнів в точках А і В. Різниця насамперед пов'язано з тим (третій член у формулі (2.28)), що швидкість приводного вітру може бути різна в точках А і В. Це призводить до того, що в точках А і В будуть різні характеристики хвилювання, а значить і різні умови відбиття від поверхні і різні форми відображених лазерних імпульсів. Тому різницю затримок лазерних луна-імпульсів на плечах схеми зондування буде визначатися не тільки відмінністю L_1 від L_2 , але й відмінністю γ_1^2 від γ_2^2 . Четвертий член у формулі (2.28) пов'язаний з тим, що через наявність нахилу рівної поверхні (коли $\beta \neq 0$) кути зондування (відлічувані від нормалі до реальної поверхні, яка зодується) для обох плечей двопроменевої схеми зондування відмінні від кута α . Другий член в формулою (2.28) виникає через кінцевої величини кута розходження джерела і поля зору приймальні оптичної системи.

На рис. 2.7 для течій Гольфстрім (рис. 2.7, а) і Каліфорнійського течії

(рис. 2.7, b) наведено залежності Δh_m від параметру $x = \frac{V_1}{V_2}$ ($V_{1,2}$ - швидкість приводного вітру в точках А і В).

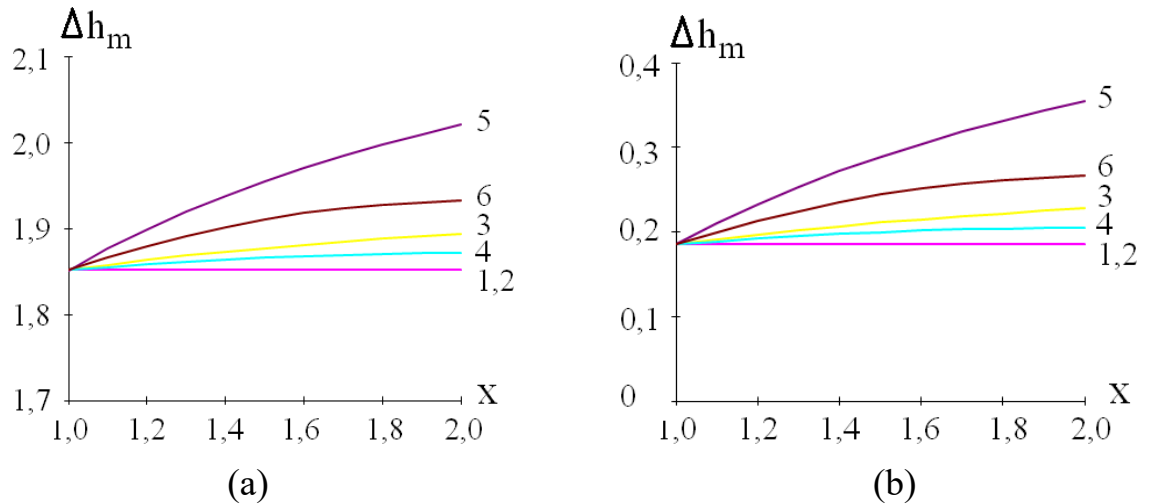


Рисунок 2.7 – Залежність параметру Δh_m від параметру $x = \frac{V_1}{V_2}$ для течій

Гольфстрім (а), та Каліфорнійської течії (b)

Розрахунки похибок Δh_m параметрів проводилися за формулою (2.28) при наступних значеннях:

$\alpha = 10^\circ$; $H = 300$ км (низькоорбітальний ШСЗ); $\alpha_r = 1,5\alpha_s$;

криві 1,2 - $2\alpha_s = 0,1$ мрад; криві 3,4 - $2\alpha_s = 1$ мрад; криві 5,6 - $2\alpha_s = 2$

мрад;

криві 1,3,5 - $V_1 = 2$ м /с (швидкість приводного вітру невелика - «легкий» вітер, піни на морській поверхні немає);

криві 2,4,6 - $V_1 = 14$ м /с (швидкість приводного вітру велика - «міцний» вітер, значна кількість піни на морській поверхні);

Величини $\gamma_{x,y}^2, S_f, A_f$ розраховувалися за такими формулами [17]:

$$\frac{1}{\gamma_x^2} = \frac{\cos^2 \varphi}{\gamma_u^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{\gamma_\sigma^2};$$

$$\frac{1}{\gamma_y^2} = \frac{\cos^2 \varphi}{\gamma_\sigma^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{\gamma_u^2};$$
(2.29)

де, $\gamma_u^2 = 3,16 \cdot 10^{-3} U$;

$\gamma_\sigma^2 = 0,003 + 1,92 \cdot 10^{-3} U$;

$S_f = 0,009U^3 - 0,3296U^2 + 4,549U + 21,33$;

$A_f \approx 0,5$;

γ_x^2, γ_y^2 - дисперсії нахилів морської поверхні вздовж і поперек лінії польоту;

$\gamma_u^2, \gamma_\sigma^2$ - дисперсії нахилів морської поверхні у напрямку вітру і поперек напрямку вітру;

φ - кут між віссю x і напрямом вітру (вважалося, що $\varphi = 0$);

U - швидкість приводного вітру (м/с).

В якості β у формулі (2.28) бралися величини, що характеризують Гольфстрім (перепад рівня 3,5 м на відстані приблизно 200 км - рис.2.7, а) і Каліфорнійський протягом (перепад рівня 40 см на 1000 км - рис. 2.7, б). Величини Δh розраховувалися при заданих β із геометричної схеми зондування.

З рисунків видно, що величина Δh_m , яка вимірюється по різниці затримок лазерних луна-імпульсів, в сильному ступені залежить від параметра x (що характеризує відмінність швидкості приводного вітру в точках А і В), кута розходження випромінювання лідара і нахилу рівної поверхні β . Чим більше відрізняються швидкості приводного вітру в точках А і В (тобто чим більше відрізняються статистичні характеристики морського хвилювання в точках А і В), тим сильніше Δh_m відрізняється від істинного значення різниці висот Δh . Причому, чим менше величина β (тобто чим менше перепади

рівня, які ми хочемо вимірювати), тим більше вагою відносний внесок помилок в вимірювану величину (тим більше відносна відміна Δh_m від Δh). Відмінність величини Δh_m від істинного значення різниці висот Δh сильно залежить і від величини швидкості приводного вітру. При невеликій швидкості (коли піни на морській поверхні немає) приводного вітру ця відмінність найбільше. Зі збільшенням швидкості приводного вітру (в тому числі і при досить великих швидкостях приводного вітру, коли на поверхні моря з'являється піна) відміну Δh_m від істинного значення різниці висот зменшується. Зі зменшенням кута розходження випромінювання лідара вплив перерахованих вище факторів зменшується і при $2\alpha_s = 0,1$ мрад величина Δh_m мало різниться від істинного значення різниці висот.

Відзначимо, що наближено вважаючи $\beta \approx \frac{\Delta h}{2H \operatorname{tg} \alpha}$, можна звернути

рівняння (2.28) і використовувати його для визначення істинного значення Δh за даними вимірів Δh_m отриманих з різниці затримок лазерних луна-імпульсів на плечах схеми зондування. Вихідною інформацією при цьому є параметри схеми зондування і дані про швидкість приводного вітру на трасі зондування.

Таким чином, результати проведених розрахунків дозволяють оцінити похибку вимірювань перепадів висот морської поверхні за допомогою лазерного висотоміра, встановленого на ШСЗ як при невеликих швидкостях приводного вітру (коли піни ще немає), так і при великих швидкостях приводного вітру (коли на поверхні моря з'являється піна). Показано, що похибки вимірювання визначаються умовами морського вітрового хвилювання (швидкістю приводного вітру) та нахилом рівної поверхні на трасі зондування і можуть бути в кілька разів більше вимірюваних перепадів висот морської поверхні. Зменшення кута розходження випромінювання лідара призводить до різкого зменшення помилок вимірювання. При куті розходження випромінювання лідара 0,1 мрад вимірюваний перепад висот практично збігається з його істинним значенням.

ВИСНОВКИ

На сьогоднішній час існуючі лазерні далекоміри використовують два принципи визначення дальності – імпульсний і фазовий. Недоліком імпульсного лазерного далекоміра, є його невисока точність вимірювання на відміну від фазового, а перевагою є вимір більш довгих дистанцій. У зв'язку з цим перспективною виглядає система, в якій імпульсний характер випромінювання поєднувався б з фазовим методом індикації та обробки сигналів, що дозволяє об'єднати переваги двох методів дальнометрії.

Підвищення точності вимірювання досягається способом зменшення довжини імпульсу в лазерних далекомірах, тому в роботі детально розглядався фемтосекундний лазерний далекомір. Також використання далекомірів з синхронним стартом забезпечує значно більш високу точність. При синхронному старті лазерний зондує імпульс випромінюється синхронно з тактовим імпульсом перетворювача (при асинхронному в довільний момент часу).

В даній роботі були проаналізовані та досліджені існуючі методи дальнометрії, з виявленням їх переваг і недоліків. Було проведено модулювання та оцінка похибки вимірювання лазерного далекоміра на прикладі вимірювання перепаду висот морської поверхні. Використані формули для оцінки похибки вимірювань перепадів висот морської поверхні за допомогою лазерного висотоміра, встановленого на ШСЗ, в умовах вітрового хвилювання і покриття морської поверхні піною. Показано, що похибки вимірювання визначаються умовами морського вітрового хвилювання (швидкістю приводного вітру) та нахилом рівної поверхні на трасі зондування і можуть бути в кілька разів більше вимірюваних перепадів висот морської поверхні. Зменшення кута розходження випромінювання лідара призводить до різкого зменшення помилок вимірювання. Встановлено що при куті розходження випромінювання лідара 0,1 мрад вимірюваний перепад висот практично збігається з його істинним значенням.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лемтюжников Д. С. Элементарный курс оптики и дальномеров: Москва, 1993. 151 с.
2. Байбородин Ю. В. Основы лазерной техники: Киев, 1988. 146 с.
3. Аснис Л. А. Лазерная дальнометрия: Москва, 1995. 257 с.
4. Барышников Н. В. Приемопередающие устройства лазерных локационных изображающих систем: Москва, 2004. 84 с.
5. Дерягин В. Н. Импульсно-фазовый светолокационный дальномер ГДФИ 1 // Оптико-механическая промышленность. 1970. №6. С. 27–29.
6. Ламанов А. Л. Макет импульсно-фазового светодальномера // Оптико-механическая промышленность. 1976. № 9. С. 17–19.
7. Кортев Н. В. Импульсно-фазовый светодальномер // Геодезия и фотограмметрия в горном деле. Свердловск, 1980. вып. 7. С. 58–62.
8. Волконский В. Б. Импульсно-фазовый дальномер на твердотельном лазере: Харьков, 1988. С. 40–42.
9. Возницкий М.В. Получение и обработка информации в импульсных лазерных дальномерах // Оптический журнал. 1993. №11. С. 15–32.
10. Вильнер В.Г. Оценка возможностей светолокационного импульсного измерителя дальности с накоплением // Фотоника. 2007. № 6. С.22–26.
11. Optical distance measurement/John Morcom: US pat. No 6753950, June 22, 2004.
12. Дерягин В. Н. Малогабаритный импульсно-фазовый светодальномер ГДФИ-3 с цифровым выходом на основе полупроводникового квантового генератора // Оптико-механическая промышленность. 1972. № 7. С. 23–27.
13. Дерягин В. Н. Высокоточный импульсный светодальномер ГДФИ-2 с фазовой индикацией на основе неохлаждаемого ПКГ // Оптико-механическая промышленность. 1970. №12. С. 27–31.
14. Войновский В. А., Купцов А. В. Причины некорректных измерений дальностей с помощью лазерных дальномеров, используемых в вооружённых

силах // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. №2. С. 165–169.

15. Кошелев А. В., Карпик А. П., Середович В. А. Фемтосекундный лазерный дальномер с распространением излучения в вакуумированной трубе // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2012. №1 (17). С. 3–8.

16. Бокшанский В.Б., Бондаренко Д.А. и др. Лазерные приборы и методы измерения дальности : учеб. Пособие: Москва, 2012. 92 с.

17. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. Osnovy impul'snoy lazernoy lokatsii: Moscow, 2010. 573 p.