

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)  
(рівень вищої освіти)

СУЧАСНА ЛАЗЕРНА ДАЛЕКОМЕТРІЯ

(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи ЛОЕТм-19-1  
Бутенко М. С.  
(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 О.С.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Мачехін Ю.П.  
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

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

**ЗАВДАННЯ**

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Бутенку Михайлу Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Сучасна лазерна далекометрія

затверджена наказом по університету від " 27 " жовтня 2020 р. № 1451 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 14 грудня 2020р.

3. Вихідні дані до роботи 1 Види далекомірів. 2 Дистанція до 10 км. 3 Характеристики випромінювання. 4 Показники заломлення середовищ

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Аналіз існуючих імпульсних далекомірів. 2 Розглянути оптичні системи передаючих та приймальних каналів.

3 Скануючі лазерні далекоміри (LIDAR). 4 Визначення робочих параметрів імпульсного далекоміра. 5 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)  
Демонстраційний матеріал — 15 шт.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про імпульсні далекоміри	04.11.20—10.11.20	Виконано
2	Розгляд і аналіз характеристик оптичних систем передаючих та приймальних каналів	11.11.20—15.11.20	Виконано
3	Визначення робочих параметрів імпульсного далекоміра	16.11.20—20.11.20	Виконано
4	Аналіз отриманих результатів	21.11.20—25.11.20	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	26.11.20—02.12.20	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	03.12.20—06.12.20	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та отримання рецензії на роботу	07.12.20—13.12.20	Виконано
8	Підготовка та захист атестаційної роботи	14.12.20—17.12.20	

Дата видачі завдання 02 листопада 2020р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

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

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи 38 с., 12 рис., 2 табл.,  
1 додаток, 15 джерел.

ІМПУЛЬСНИЙ ЛАЗЕРНИЙ ДАЛЕКОМІР, ПОХИБКА ВИМІРЮВАННЯ  
ВІДСТАНЕЙ, МАКСИМАЛЬНА ДАЛЬНІСТЬ, ІМПУЛЬСНА ЕНЕРГІЯ  
ВИПРОМІНЮВАННЯ, СКАНУЮЧИЙ ЛАЗЕРНИЙ ДАЛЕКОМІР

Об'єкт дослідження — імпульсний лазерний далекомір.

Метод дослідження — теоретичний и експериментальний.

Мета роботи — дослідження питання, пов'язаного з реалізацією імпульсних лазерних далекомірів в складі оптико-локаційних систем різного призначення.

Завдання: аналітичний огляд характеристик можливо і сфер застосування імпульсного лазерного далекоміра; дослідження конструкційних особливостей, можливостей та характеристик імпульсних лазерних далекомірів; джерела визначення похибки дистанцій; визначення максимальної дальності роботи далекоміра; огляд і аналіз принципу роботи скануючих лазерних далекомірів (LIDAR).

## **ABSTRACT**

Explanatory note of the attestation work 38 p., 12 figures, 2 tables, 1 appendices, 15 sources.

**LASER RANGE, DISTANCE ERROR, MAXIMUM RANGE, PULSE RADIATION ENERGY, SCANNING LASER RANGE (LIDAR)**

The object of research is a pulsed laser rangefinder.

The research method is theoretical and experimental.

The purpose of this work is to study the issue related to the implementation of pulsed laser range finders as part of optical location systems for various purposes.

Objective: an analytical review of the characteristics and possible areas of application of the laser rangefinder; research of features, capabilities and characteristics of pulsed laser range finders; sources for determining the error of distances; determining the maximum range of work distance numbers; review and analysis of the principle of operation of scanning laser range finders (LIDAR).

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка аттестационной работы 38 с., 12 рис., 2 табл., 1 приложение, 15 источников.

ЛАЗЕРНЫЙ ДАЛЬНОМЕР, ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ, МАКСИМАЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ, ИМПУЛЬСНАЯ ЭНЕРГИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ, СКАНИРУЮЩИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ДАЛЬНОМЕР

Объект исследования — импульсной лазерный дальномер.

Метод исследования — теоретический и экспериментальный.

Цель работы — исследование вопроса, связанного с реализацией импульсных лазерных дальномеров в составе оптико-локационных систем различного назначения.

Задача: аналитический обзор характеристик возможно и сфер применения лазерного дальномера; исследования особенностей, возможностей и характеристик импульсных лазерных дальномеров; источники определения погрешности дистанций; определения максимальной дальности работы дальномера; обзор и анализ принципа работы сканирующих лазерных дальномеров (LIDAR).

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Аналітичний огляд імпульсного далекоміра.....	9
1.1 Загальні відомості про імпульсні далекоміри.....	9
1.2 Оптичні системи передаючих каналів .....	14
1.3 Оптичні системи приймальних каналів .....	18
1.4 Чотири покоління лазерних далекомірів .....	19
1.5 Використання лазерних імпульсних далекомірів у військових цілях .....	25
1.6 Скануючі лазерні далекоміри (LIDAR) .....	27
1.7 Практичне використання тривимірного лазерного сканування.....	30
2 Визначення робочих параметрів імпульсного далекоміра .....	33
Висновки .....	36
Перелік джерел посилання .....	37
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	39

## ВСТУП

Значна кількість практично важливих задач пов'язано з дистанційними вимірами дальності. Успішна їх реалізація можлива з використанням методів лазерної дальнометрії. Далекомірні пристрої, крім самостійного застосування, можуть ефективно поєднуватися з інформаційними каналами інших типів. Це забезпечує створення складних апаратно-програмних комплексів, здатних здійснювати інформаційне забезпечення широкого кола споживачів.

Істотна увага в лазерній дальнометрії приділяється, як правило, питанням оптимізації апаратурних рішень. Однак не менш важливу роль в дистанційних вимірах грають також проблеми проходження інформаційних світлових потоків через атмосферу і відображення їх від лоцируємих об'єктів. Одним з принципів елементів практичного використання далекомірів є лазерна безпека.

Мета роботи — дослідити питання, пов'язані з реалізацією лазерних імпульсних далекомірів в складі оптико-локаційних систем різного призначення.

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.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІМПУЛЬСНОГО ДАЛЕКОМІРА

## 1.1 Загальні відомості про імпульсні далекоміри

Принцип дії лазерних імпульсних далекомірів (рис. 1.1) заснований на вимірюванні інтервалу часу між моментом випромінювання зондуючого лазерного моноімпульса (старт-імпульс) і моментом прийому випромінювання, відбитого від об'єкта (стоп-імпульс). 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 світлоділяника) 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 за сигналом 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.

Отже, лазерний імпульсний далекомір це пристрій, що складається з імпульсного лазера і детектора випромінювання. Вимірюючи час, який витрачає промінь на шлях до відбивача і назад і знаючи значення швидкості світла, можна розрахувати відстань між лазером і відображає об'єктом.

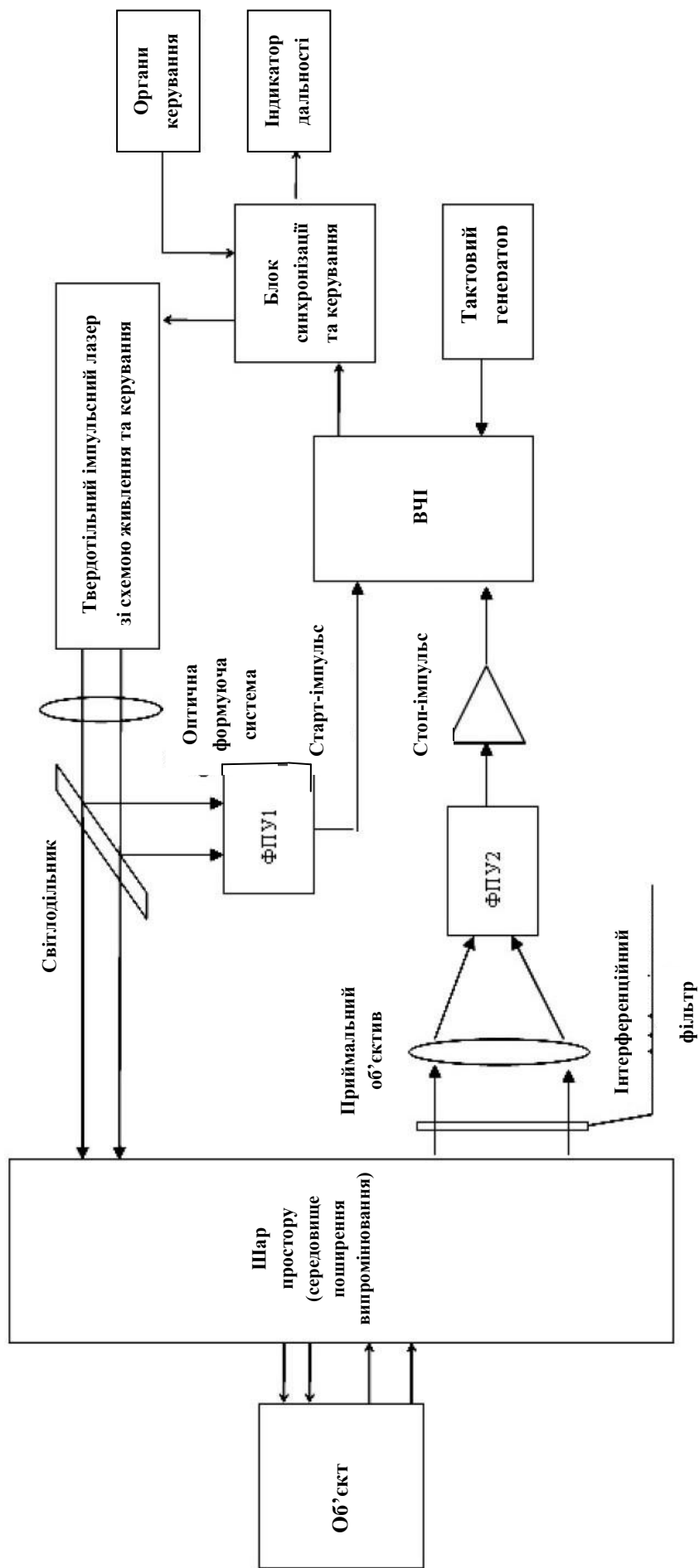


Рисунок 1.1 – Функціональна схема лазерного імпульсного далекоміра

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

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

де  $L$  — відстань до об'єкта;

$c$  — швидкість світла у вакуумі;

$n$  — показник заломлення середовища, в якому проходить випромінювання;

$t$  — час проходження імпульсу до цілі і назад.

Як випливає з виразу (1.1), для зменшення похибки вимірювання дальності до об'єкта необхідно забезпечити сталість швидкості поширення випромінювання в шарі середовища і його прямолінійність. Ці умови не завжди здійсненні: наприклад, при розташуванні далекоміра на повітряному судні і скануванні їм об'єктів на Землі необхідно враховувати явище рефракції, що приводить до викривлення оптичного шляху лазерного випромінювання. При лазерній локації в турбулентних середовищах оптичний шлях лазерного випромінювання також спотворюється (відрізняється від прямолінійного) [1].

Основний внесок в похибку вимірювання дальності до об'єкта вносять похибки, що виникають при вимірі тимчасового інтервалу між моментами послілки і прийому випромінювання зондуєчого 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 за дисперсією пов'язаної з нею похибки:

$$D = \frac{\Delta d^2}{6},$$

де  $\Delta d$  — дискретність вимірювача часових інтервалів в одиницях дальності. Тоді середнє квадратичне відхилення оцінки дальності складе  $\delta = 0,408\Delta d$ . При використанні тактового генератора для вимірювача часових інтервалів з частотою від 150 МГц до 300 МГц похибка, викликана дискретністю, складе 0,1—0,2 м [2].

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. 1.2).

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 перетині 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 правило, в динамічному діапазоні амплітуд, що не перевищує 100.

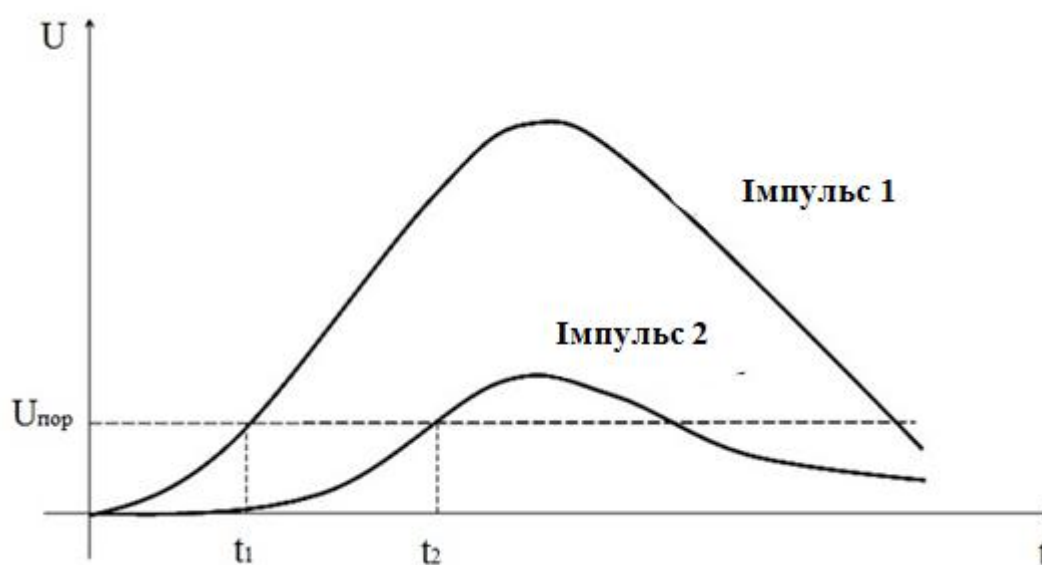


Рисунок 1.2 — Часова фіксація імпульса за рівнем

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

Лазерні дальномірні 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 незмінний і визначається оператором. Це спрощує отримання задовільного сталого дозволу і знижує вимоги до вимірювача часових інтервалів.

Дозвіл вимірювача часових інтервалів має бути набагато вищий, ніж дозвіл всієї далекомірної системи в цілому, який визначається рівнем шумів і часом вимірювання. Дозвіл вимірювача часових інтервалів 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 вимірювача часових інтервалів, хоча він є одним із основних джерел похибок. В цілому стабільність вимірювача часових інтервалів не суттєва для точних вимірювань, оскільки лазерний далекомір неодноразово калібрується в процесі вимірювань [3].

## 1.2 Оптичні системи передаючих каналів

Як джерела випромінювання імпульсного далекоміра можуть бути використані лазерні випромінювачі двох типів. До першого типу відносяться твердотільні імпульсні лазери. Конструктивно вузол імпульсного лазерного випромінювача виконаний у вигляді окремого модуля (рис. 1.3). Випромінювачі даного типу забезпечують як високу енергетику підсвітки, так і велику імпульсну потужність. Оптична формуюча система таких лазерів не є складною і громіздкою. Однак основним недоліком випромінювачів на основі твердотільних імпульсних лазерів є їх низький ККД, що обумовлює відносно

великі габарити (в першу чергу габарити системи харчування), високу вартість каналу підсвіткi, низьку надійність в процесі експлуатації.



Рисунок 1.3 — Загальний вигляд імпульсних лазерних модулів

Як правило, твердотільні імпульсні лазерні випромінювачі формують пучок з нижчої модою і гаусовим профілем пучка. Типова розбіжність  $2\omega$  у твердотільних лазерних випромінювачів лежить в діапазоні 1—10 кутових хвилин.

У разі збігу необхідного кутового поля підсвічування і кутової розбіжності обраного твердотільного лазерного джерела передавальний канал далекоміра буде складатися з одного лазерного модуля без додаткової формуючої оптичної системи. Залежно від розв'язуваної задачі (від кутового поля підсвічування) може знадобитися зміна кутової розбіжності лазерного випромінювання, яка може бути скоригована як у велику, так і в меншу сторону за допомогою додаткової формуючої оптичної системи. У ролі такої формуючої системи може виступати телескопічна система Кеплера або Галілея.

Висока щільність потоку лазерного випромінювання може призводити до нагрівання елементів формуючої оптичної системи, тому при виборі схеми для цієї системи необхідно виключити варіанти з проміжним дійсним зображенням. Схема Кеплера має проміжне дійсне зображення всередині системи. Таким чином, розробка формуючої оптичної системи для далекоміра з твердотільним

імпульсним лазерним джерелом зводиться до розрахунку зворненої телескопічної системи Галілея (рис. 1.4).

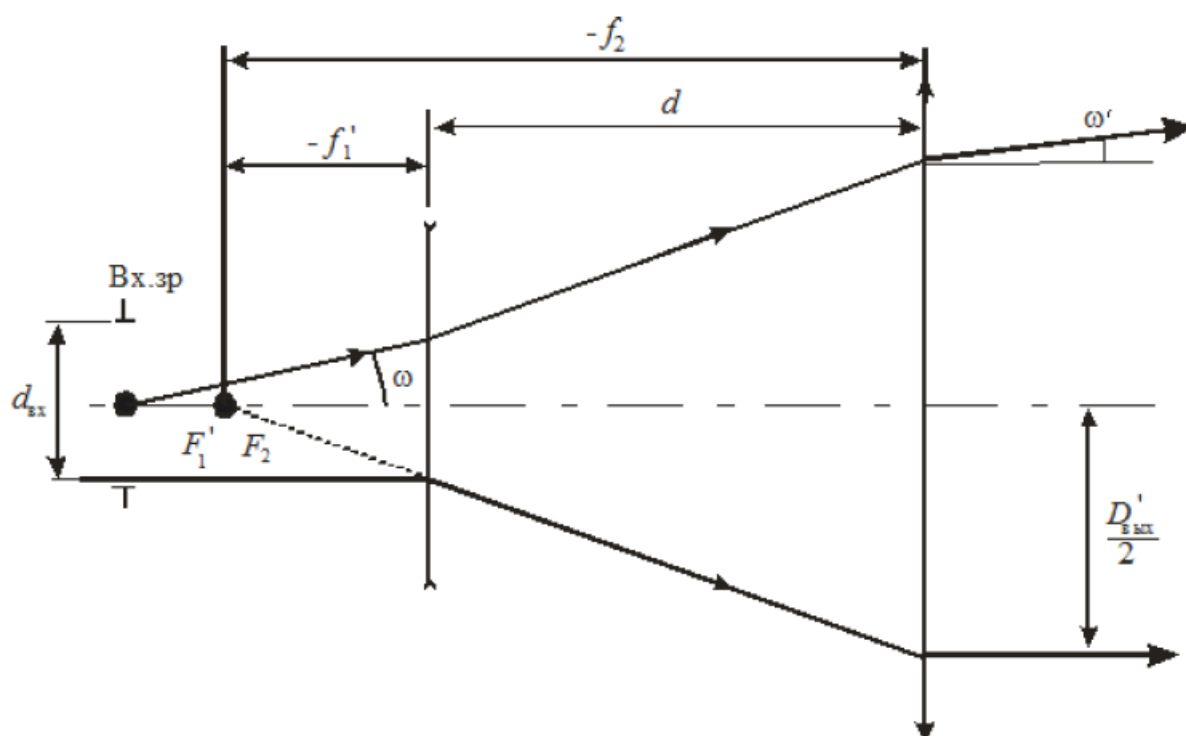


Рисунок 1.4 — Геометрооптична схема і хід апертурного і головного променів в телескопічній системі Галілея

До другого типу лазерних випромінювачів передавальних каналів далекомірів відносяться напівпровідникові випромінювачі — лазерні діоди. Застосування напівпровідникового випромінювача дозволяє зменшити габарити і масу передавального каналу далекоміра. Суттєвими перевагами лазерних напівпровідникових випромінювачів є високий ККД, великий термін служби, стійкість до механічних і кліматичних навантажень, простота управління параметрами випромінювання, такими, як потужність, частота, шпаруватість, що важливо в активних локаційних системах.

Особливістю лазерного випромінювання напівпровідникових випромінювачів є різна розбіжність в меридіональному і сагітальному перетинах, яка обумовлена дифракцією на торці гетероструктури діода.

Внаслідок малих розмірів випромінюючої поверхні випромінювання лазерних діодів має велику розбіжність, особливо вздовж швидкої осі, тобто вздовж напрямку з мінімальним розміром випромінюючої зони. Типова розбіжність напівпровідникових лазерів становить  $(30^\circ \dots 60^\circ) \times (10^\circ \dots 25^\circ)$ .

Найпростіша формуюча система при використанні одноелементних лазерних діодів складається з проєкційного об'єктива (рис. 1.5).

В цьому випадку пляма підсвічування виходить неоднорідною внаслідок протяжного характеру світіння *p-n*-переходу. Розфокусування об'єктива дозволяє в невеликих межах гомогенізувати пляму підсвічення, але призводить до істотного збільшення розмірів плями і до енергетичних втрат (60—70 %).

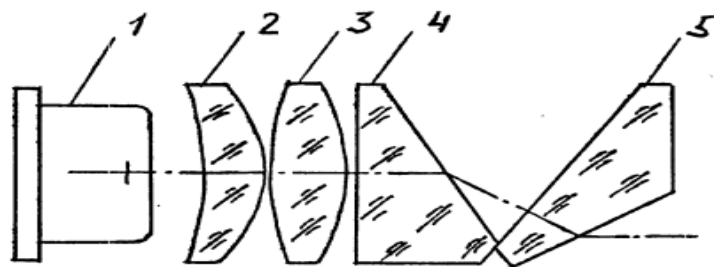


Рисунок 1.5— Формуюча оптична система лазерного напівпровідникового діода

На рисунку зображені наступні елементи: лазерний випромінювач 1, елементи оптичної системи 2—5. При використанні телескопічної системи для формування необхідної індикатриси підсвічення у вхідній зіниці системи проєктується зображення випромінюючої поверхні лазерного діода. При необхідності трансформації розмірів тіла світіння доводиться вводити анаморфотні компоненти, причому для звуження кута розходження випромінювання з типовим для напівпровідникових лазерів значень  $30^\circ \dots 60^\circ$  до  $1^\circ$  збільшення телескопічної системи становить  $(30 \dots 60)^x$ , що визначає її істотні поздовжні габарити. Іншим недоліком телескопічної системи є нераціональне використання вхідної зіниці через невідповідність його круглої

форми прямокутній форми тіла світіння лазерного діода. Застосування сполучної волоконної оптики дозволило б усунути цей недолік, але привело б до додаткових енергетичних втрат. Тому застосування телескопічних систем в якості формуючих систем напівпровідникових лазерних випромінювачів недоцільно.

### 1.3 Оптичні системи приймальних каналів

Приймальний канал лазерного далекоміра реєструє оптичні сигнали малої потужності і виділяє їх на фоні завад. Для поліпшення прешкодозахищеності приймальний канал повинен мати мінімальне кутове поле зору і реєструвати випромінювання тільки на довжині хвилі підсвічення. Для стійкої роботи далекомірного каналу в умовах турбулентності атмосфери 15—20 кутових секунд і при кутових завадах наведення 1—2 кутових хвилин поле зору приймального каналу має становити кілька кутових хвилин.

Таким чином, приймальна оптична система далекоміра повинна складатися з довгофокусного приймального об'єктива інтерференційного світлофільтру на довжині хвилі підсвічення. Прийняте випромінювання збирається на світлочутливій поверхні фотодіода, сигнал з якого надходить в електронний блок вимірювання тимчасових інтервалів. У лазерних далекомірах в якості швидкодіючих приймачів випромінювання використовують фотоприймачі з однією поверхнею — лавинні фотодіоди. Приймальний канал далекоміра, функціональна оптична схема якого представлена на рис. 1.6, складається з інтерференційного фільтра, приймального об'єктива і лавинного фотодіода.

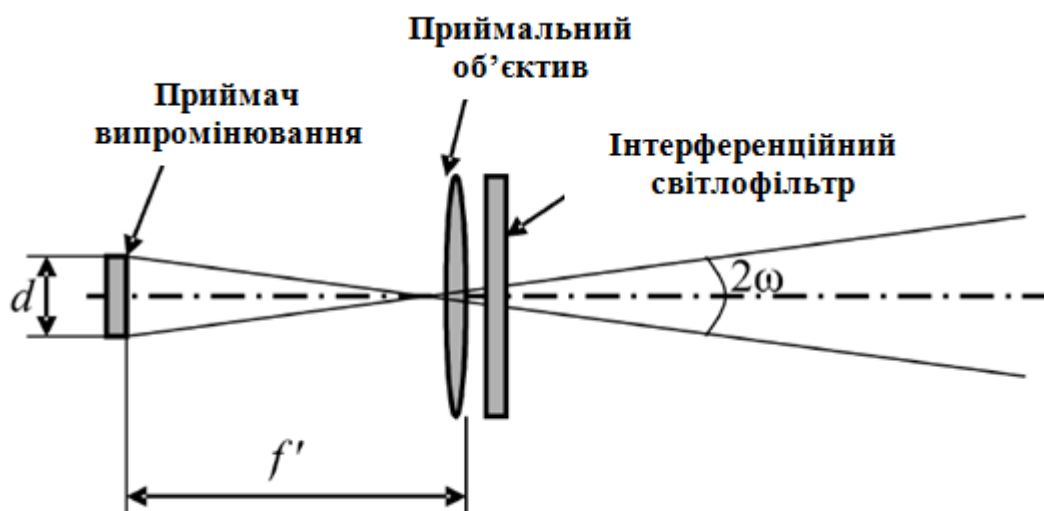


Рисунок 1.6 — Функціональна оптична схема приймального каналу далекоміра

#### 1.4 Чотири покоління лазерних далекомірів

В даний час за допомогою лазерної дальнометрії стало можливим визначати відстань до штучних супутників Землі (ШСЗ) з міліметровою точністю. Вимірювання відстані до космічних апаратів дозволяє уточнювати орбіти ШСЗ, а спостереження спеціалізованих супутників, оснащених ретрорефлекторами, дає можливість визначати параметри обертання Землі.

Зовсім недавно лазерні локаційні станції визначали відстань до ШСЗ з точністю 1—2 м. Такі лазерні супутникові далекоміри були далекомірами першого покоління. Точність далекомірів другого покоління становить від 1 см до 0 см, третього від 1 см до 5 см. Сьогодні впроваджуються лазерні далекоміри четвертого покоління, у яких відстань до ШСЗ може бути визначена з точністю до декількох міліметрів [4].

У далекомірах першого, другого і третього поколінь досяжна точність визначається тривалістю імпульсу лазерного джерела. Наприклад, тривалість імпульсу лазерного супутникового далекоміра ЛД-2 становить від 40 нс до 50 нс дозволяє визначати відстань до ШСЗ з похибкою до 2,5 м. При цьому кут розходження лазерного пучка на виході коліматора далекоміра становить

50 "[5]. Для зменшення тривалості імпульсу досить в далекомірі ЛД-2 лазерний випромінювач на рубін замінити на YAG: Nd-лазер (довжина хвилі 1 064 нм) з наступним подвоєнням частоти (довжина хвилі 532 нм).

Імпульси більшої потужності і тривалістю 3,3 нс при його формуванні можна отримати, використовуючи пасивні затвори. Після такої модернізації розбіжність лазерного пучка на виході з коліматора склала 160 ", а дальність лоцирування залишилася колишньою 3500 км [6]. Зменшення тривалості імпульсу до 3,3 нс дозволяє визначати відстань з похибкою 10—15 см. Це дає право вважати даний далекомір далекоміром другого покоління.

У свою чергу, істотний внесок в похибка визначення відстані вносить атмосферна поправка. Одним з методів її визначення є дисперсійний метод, заснований на одночасному проходженні через товщу атмосфери двох імпульсів лазерного випромінювання з різними довжинами хвиль. Визначивши атмосферну поправку дисперсійним методом, можна визначити відстань з міліметровою точністю.

Для реалізації дисперсійного методу необхідно, щоб два лазерних пучка з різними довжинами хвиль після проходження через коліматор мали кут розходження близький до дифракційного без додаткового перефокусування коліматора. У свою чергу апертурне збільшення лазерного пучка дозволяє зменшити його розбіжність при проходженні через коліматор.

Фахівцями був проведений розрахунок коліматора лазерного променя для довжин хвиль 532 і 1064 нм. Розрахунок коліматора був здійснений з урахуванням габаритних розмірів штатного коліматора ЛД-2 з метою мінімізації змін в конструкції далекоміра.

Розрахунок коліматора був здійснений по оптичних схемах Кеплера і Галілея. Оптичні схеми розрахованих коліматорів представлені на рис. 1.7. Дані коліматори містять оптично пов'язані позитивний трьохлінзовий об'єктив і двохлінзовий склеєний негативний окуляр в схемі Галілея і позитивний трьохлінзовий окуляр в схемі Кеплера.

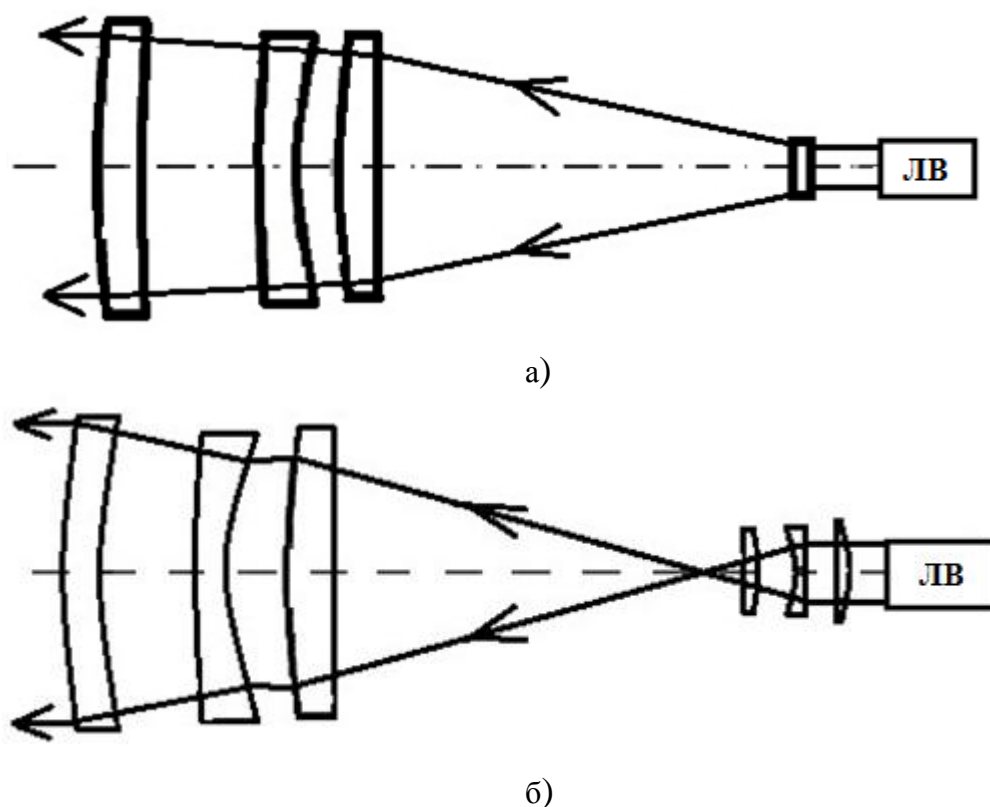


Рисунок 1.7 — Оптичні схеми Галілея (а) і Кеплера (б)  
(ЛВ — лазерний випромінювач)

Коефіцієнт пропускання склав 0,84 і 0,86 відповідно для довжин хвиль 532 нм і 1064 нм. Кут розбіжності променя визначається дифракцією на апертурі об'єктива коліматора і приблизно дорівнює 1" і 2" відповідно для довжин хвиль 532 і 1064 нм.

Поверхні всіх лінз сферичні і матеріал лінз — оптичне скло ТФ10 і К8, що здешевлює вартість виготовлення коліматорів.

Отже, використання розрахованих коліматорів уможливило зменшення похибки до міліметрів (за рахунок визначення атмосферної поправки дисперсійним методом на довжинах хвиль 532 і 1064 нм) при визначенні відстані до КА.

Відстань до ШСЗ обчислюється зі співвідношення [7]:

$$L = \frac{c\tau}{2\tilde{n} + \delta L},$$

де  $c$  — швидкість світла;

$\tau$  — час проходження імпульсу до ШСЗ і назад;

$\tilde{n}$  — усереднений показник заломлення атмосфери уздовж траєкторії лазерного променя і обчислюється за формулою:

$$\tilde{n} = \left(\frac{l}{z}\right) \cdot \left(\int_z n dl\right),$$

де  $l$  — променева траєкторія;

$\tau$  — поточне значення показника заломлення повітря;

$n$  — довжина траєкторії;

$\delta L$  — 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 поширення сигналу, точність визначення і поправки.

За типом лазерного передавача і досяжної точності лазерні далекомірні системи (ЛДС) класифікують наступним чином: 1-е покоління: з тимчасовим дозволом 10—30нс, друге покоління: з тимчасовим дозволом 1—5 нс, третє покоління: з тимчасовим дозволом 0,1—0,5 нс. Міжнародна лазерна мережа оснащена лазерними далекомірними системами ЛДС третього покоління. У

нашій країні аналогічні пристрої в стадії розробки. Можливий алгоритм обчислення параметрів обертання Землі для технології ЛДС представлений в [8].

Далі будуть наведені фактори, що визначають точності характеристики ЛДС.

Дотепер проведено аналіз наступних складових похибок:

- інструментальна похибка, пов'язана з точністю вимірювання;
- атмосферна складова похибки в залежності від обраної моделі атмосфери;
- похибка синхронізації часу і астрономічної тимчасової шкали;
- похибки геометричної редукції ЛДС.

Для прикладу, чисельні значення похибок визначення відстаней до ШСЗ для ЛДС 2-го покоління представлені в таблиці 1.1 [9].

Таблиця 1.1 — Похибки визначення відстаней

№	Вид операцій	Погрешность, см
1	Калібрування	1,7
2	Похибка вимірювання, $\tau$	3,3
3	Нестабільність системи	4,0
4	Тимчасова прив'язка	3,5
5	Атмосферна поправка	3,0
6	Поправка по відбивачу	2,9
7	Сумарна середньоквадратична помилка	7,7

Видно, що найбільший внесок у помилки вимірювань вносить складова системи і похибка атмосфери. Похибка системи зменшується калібрувальними вимірами до мішені з точною відстанню, і способи її зменшення будуть розглянуті нижче. Значно ж зменшити величину атмосферної похибки досить важко. Виходом з цієї ситуації є використання технології ЛДС четвертого покоління — двохвильового методу локації [10]. Вже проведені експериментальні випробування таких систем. Зручними для цього методу є випромінювачі на основі гранатового YAG: Nd-лазера, випромінюючих на двох

досить рознесених довжинах хвиль 1,06 і 0,53 мкм. Аналіз проходження двохвильового лазерного імпульсу вказує на дещо меншу величину втрат для першої гармоніки випромінювання.

У двохвильовому методі локації використовується явище дисперсії показника заломлення повітря. В силу цього явища оптичні довжини на двох різних частотах відрізняються пропорційно усередненій по шляху променя щільності атмосфери. Різниця оптичних шляхів на цих частотах використовується для оцінки непереборної в однохвильовому випадку атмосферної поправки. Залишається неврахована похибка через щільність водяної пари в атмосфері. Але вона дуже мала і дає помилку в межах часток сантиметра.

Зниження інструментальної похибки досягається [11]:

- створенням лазерів надкоротких світлових імпульсів пікосекундного діапазону;
- створенням надшвидкодійних приймачів лазерного випромінювання;
- урахуванням теплового розпливання і самовідхилення променя в поглинаючій атмосфері;
- урахуванням впливу бокового вітру на лазерний пучок.

Реалізація зазначених проблем дозволить знизити інструментальну похибку у визначенні відстаней до рівня часток сантиметра. Похибки прив'язки до передавальної і приймальної площин відліку — площинам, поєднаним з елементами конструкції ЛДС і ШСЗ — детально проаналізовані методом імітаційного моделювання [11]. Похибки часової прив'язки до зовнішнього ідеалу часу в залежності від форми імпульсу досліджені в [12, 13].

Проведений аналіз похибок показує, що сумарна похибка вимірювань відстаней сучасними ЛДС може становити частки сантиметра.

Застосування лазерів фемтосекундного діапазону для цілей дальнометрії в даний час недоцільно через непереборних залишкових похибок у вимірюванні відстаней і невивченості питань проходження лазерного випромінювання в реальній атмосфері. Крім цього, до теперішнього часу відсутні приймальні

пристрої з фемтосекундним тимчасовим дозволом. Проте, перші роботи з зондування атмосфери фемтосекундним випромінюванням вже проведені. Пристрої з фемтосекундними випромінювачами найбільш перспективні в космічних завданнях, поза атмосферою Землі.

### 1.5 Використання лазерних імпульсних далекомірів у військових цілях

Лазерна дальнометрія є однією з перших областей практичного застосування лазерів у закордонній військовій техніці. Лазерні далекоміри, встановлені на сучасних танках, дозволяють вимірювати дальність до цілі в межах від 200 м до 8000 м (на американських і французьких танках) і від 200 м до 10000 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 ітрієво-алюмінієвого граната, в який в якості активних центрів введені іони неодиму). 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. Лазери на рубін генерують випромінювання на довжині хвилі 0,69 мкм.

Останнім часом на зарубіжних бойових машинах почали застосовуватися лазерні далекоміри на вуглекислому газі. У  $\text{CO}_2$ -лазері в газорозрядній трубці знаходиться суміш, що складається з вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), молекулярного азоту ( $\text{N}_2$ ) і різних невеликих добавок у вигляді гелію, парів води і т. д. Активні центри — молекули  $\text{CO}_2$ . 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 цілі при роботі з тепловізійним прицілом.

Новий лазерний далекомір LLDR 2H оснащений вдосконаленою системою визначення координат і кутомірних вимірювань. Вона включає до свого складу: приймач супутникової навігаційної системи NAVSTAR (точність визначення полярних координат від 2 м до 3 м, по висоті до 6 м, в залежності від характеру і рельєфу місцевості); кутомірний блок, доповнений азимутним модулем високої точності HAAD (High Accuracy Azimuth Device), а також оптичну астрономічну систему, призначену для визначення орієнтирних напрямків по Сонцю і зіркам першої величини. Точність визначення дирекційних кутів при цьому становить менше однієї тисячної поділу кутомірної шкали, що в два і більше разів перевищує показники, одержувані існуючими геодезичним та гіроскопічним способами (рис. 1.8).

Характеристики лазерного далекоміра LLDR 2H: межа вимірювання дальності — 20000 м; точність вимірювання дальності  $\pm 5$  м; дальність цілевказівки до 10000 м; точність визначення координат цілі на дальності 20 км складає до 8 м; довжина хвилі випромінювання лазерного далекоміра — 1,57 мкм [14].

До числа недоліків даної системи американські військові фахівці відносять залежність від погодних умов, що впливають на видимість небесних тіл. Для усунення цього в LLDR 2H передбачена можливість використання цифрового магнітного компаса і записи з функцією збереження на вбудованій карті пам'яті даних про всі проведені вимірах за програмними цілями (орієнтирів) і їх результати. Останні можуть послужити основою для розрахунку координат по новим цілям. У віддаленій перспективі кутомірна система повинна бути замінена новою, що отримала найменування PAAVAM (Precision Azimuth And Vertical Angle Measurement). Її розробку на конкурсній основі веде група американських фірм.



Рисунок 1.8 — Військовий лазерний імпульсний далекомір LLDR 2H

### 1.6 Скануючі лазерні далекоміри (LIDAR)

Тривимірне лазерне сканування є новим методом лазерних вимірювань, що використовуються для вирішення різних виробничих і інженерних задач (проектування, реконструкція, будівництво і т.д.) [15].

В основі методу лазерного сканування лежить визначення координат окремих реєстрованих точок на поверхні вимірюваного об'єкта за трьома вимірами ( $X$ ,  $Y$  і  $Z$ ), яке виконуються за допомогою високоточного швидкісного (десятки тисяч вимірів в секунду) лазерного далекоміра.

Принцип сканування полягає в тому, що після вимірювання координат окремої фіксованої точки на поверхні об'єкту лазерний пучок розгортається на деякий заданий кут для того, щоб перейти на наступний вузол уявної

координатної сітки, де знову проводиться визначення координат. Так триває до тих пір, поки не буде просканована вся поверхня вивчального об'єкта.

Слід зазначити, що підвищення щільності вузлів в координатній сітці підвищує загальну кількість знятих точок, а, отже, збільшує детальність зйомки. Координати окремих точок, отримані в результаті сканування об'єкта, об'єднуються в групи, звані хмарами точок. Кількість точок в хмарі варіюється від декількох сотень до сотень тисяч (а часом і мільйонів). Вимірюючи відстань і знаючи кут відхилення лазерного променя в горизонтальній і вертикальній площинах, можна отримати тривимірні координати кожної окремої точки в системі координат сканера, а потім за допомогою додаткових операцій і спеціалізованого програмного забезпечення прив'язати отриману хмару точок до будь-якої іншої системи координат [14].

Робота більшості лазерних сканерів заснована на використанні імпульсних лазерних далекомірів. Сканування лазерним пучком здійснюється кроковими електромоторами з закріпленими на них дзеркалами. Одне з дзеркал відхиляє промінь лазера в горизонтальному напрямку, а інше — в вертикальній площині (рис. 1.9).

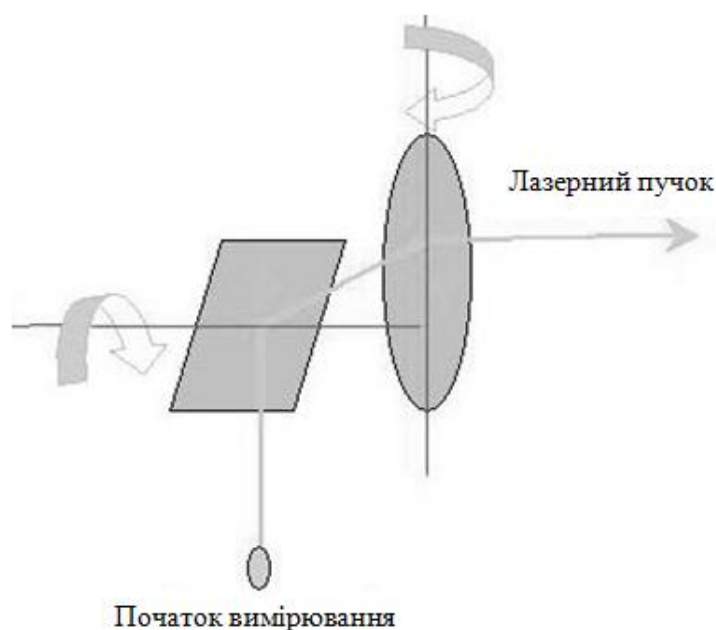


Рисунок 1.9 — Двокоординатне сканування лазерним пучком

Однак, останнім часом використовується і інша система сканування. У цій системі промінь лазера в горизонтальному напрямку відкидається не дзеркалом, а за допомогою ступеневого (крокового) обертання сканера навколо властивої осі. Це дозволяє здійснювати зйомку усього навколишнього сканер-простору. Так, наприклад, в лазерному сканері Leica HDS3000 поле зору складає  $360^\circ$  по горизонталі і  $270^\circ$  по вертикалі.

Багато сучасних лазерних сканерів володіють вбудованою цифровою фотокамерою, яка служить для фотозйомки навколишнього сканер-простору, в результаті чого користувач зможе побачити на екрані панорамну фотографію. Надалі це дає можливість вибрати із загальної фотографії тільки те, що потрібно для досягнення результату вимірів, уникнувши сканування непотрібних фрагментів.

У мобільних наземних робототехнічних комплексах і безпілотних літальних апаратах (БПЛА) ця технологія відіграє дуже важливу роль: вона використовується для автоматичної побудови тривимірної карти (сцени) навколишнього простору і просторової орієнтації апарату. Існують різні варіанти систем LIDAR, але в загальному випадку всі вони включають такі ключові елементи, що визначають принцип роботи системи: джерело фотонів (найчастіше це лазер); детектор фотонів; тактований ланцюг; оптична приймально-передавальна частина [16].

Системи LIDAR часопрольотного типу (Time-of-Flight, ToF) використовують короткі імпульси лазерного випромінювання, з високою точністю фіксуючи моменти їх передачі і прийому відгуків (відбитих сигналів), щоб обчислити відстані до об'єктів в навколишньому просторі або на поверхні землі (наприклад, при топозйомці з БПЛА). Після об'єднання серії таких вимірювань з інформацією про місцезнаходження і орієнтації апарату, створюється результуюча тривимірна сцена цікавої області простору. Найчастіше ця сцена зберігається у вигляді масиву координат  $(x, y, z)$ , званого хмарою точок.

Принципові відмінності окремих пристроїв LIDAR полягають в реалізації функції вимірювання відстані. Найважливіший вузол системи LIDAR — підсистема вимірювання відстані — складається, в свою чергу, з таких внутрішніх підсистем, як лазерний передавач і електрооптичний приймач. Лазерний передавач випромінює енергію у вигляді сфокусованого променя, який до виходу з пристрою проходить через ряд перетворювальних компонентів: перемикач приймач, розширювачі променя, вихідна телескопічна оптика та інше. В системі LIDAR можуть використовуватися різні типи лазерів, але найчастіше застосовують твердотільний Nd:YAG-лазер, активним середовищем, в якому виступає алюмоітрієвий гранат ( $Y_3Al_5O_{12}$ ), легований іонами неодиму.

В системі LIDAR зазвичай використовується один з двох режимів, що визначають метод вимірювання відстані: імпульсний режим або режим безперервної хвилі.

У системах з імпульсною модуляцією, також відомих як часопрольотні системи, лазером випромінюються поодинокі світлові імпульси з високою частотою проходження. Вимірюється час, що минув з моменту випромінювання імпульсного сигналу до моменту повернення відгуку в приймач. Відстань до точки поверхні об'єкта, в якій сталося відображення лазерного променя, може бути обчислено за формулою 1.1.

### 1.7 Практичне використання тривимірного лазерного сканування

Отже, лазерний сканер — це вимірювальний прилад, який в змозі фіксувати координати точок на поверхні об'єкту, що знімається. Фіксація даних відбувається дуже швидко — зі швидкістю кілька тисяч точок в секунду. Внаслідок цього за відносно невеликий проміжок часу можливий збір дуже великого обсягу даних. Результатом роботи тривимірної лазерної скануючої системи є хмари точок, із заданим ступенем деталізації досліджуваного об'єкту, який описується.

Однією із сфер застосування, де найбільш повно використовуються можливості лазерного сканера, є архітектура і реставрація історичних об'єктів. Лазерне сканування дає можливість провести зйомку пам'ятника, фасаду історичної будівлі або археологічного об'єкта в лічені години.

Іншим прикладом застосування лазерних сканерів є зйомка об'єктів нафтогазової промисловості та енергетичного комплексу. Часом об'єкти такого роду являють собою немислиму переплетення трубопроводів, насосів, вентилів, різних конструкцій у вигляді кутів, балок і багато чого іншого. Такі об'єкти найчастіше експлуатуються протягом тривалого часу. Неодноразова модернізація, яка відбувалася, не завжди відмічалася у відповідних кресленнях і планах, і деякі вузли були безповоротно втрачені.

У всіх подібних випадках на допомогу може прийти тривимірне лазерне сканування, яке дозволяє оперативно відбити поточний стан обладнання на екрані комп'ютера.

З'являється можливість не тільки зберегти інформацію про об'єкт, що знімається, але і використовувати її для реконструкції підприємства (рис. 1.10). Наприклад, маючи інформацію у вигляді хмар точок, можна імпортувати в програму обробки модель нового обладнання. Програма покаже всі місця можливих нестиковок.

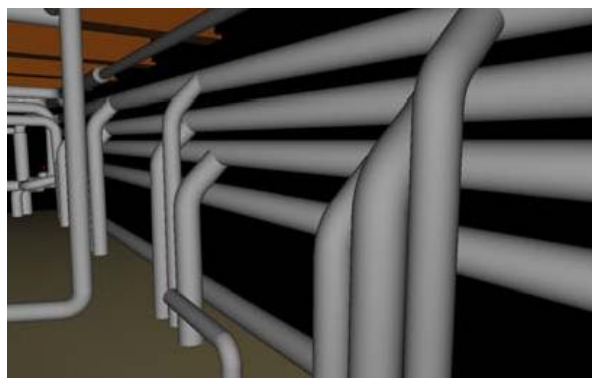
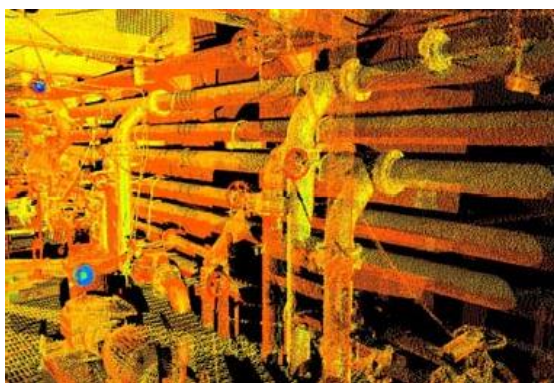


Рисунок 1.10 — Комп'ютерне віртуальне зображення фрагмента від виробничого об'єкта (а) і його реконструкція (б) [14]

Останнім часом з'явився значний інтерес до використання методу лазерного сканування для збереження об'єктів культурної та історичної спадщини (шляхом архівування інформації про них). Зокрема, наразі в багатьох країнах світу ведуться роботи зі створення тривимірних віртуальних копій найцінніших творів мистецтва, архітектурних пам'яток і археологічних об'єктів. Це дозволяє відновити пам'ятники в разі їх пошкодження або втрати.

На рис. 1.11 приведена фотографія і комп'ютерне зображення віртуальної копії середньовічної мармурової статуї, отримане за допомогою даного методу.

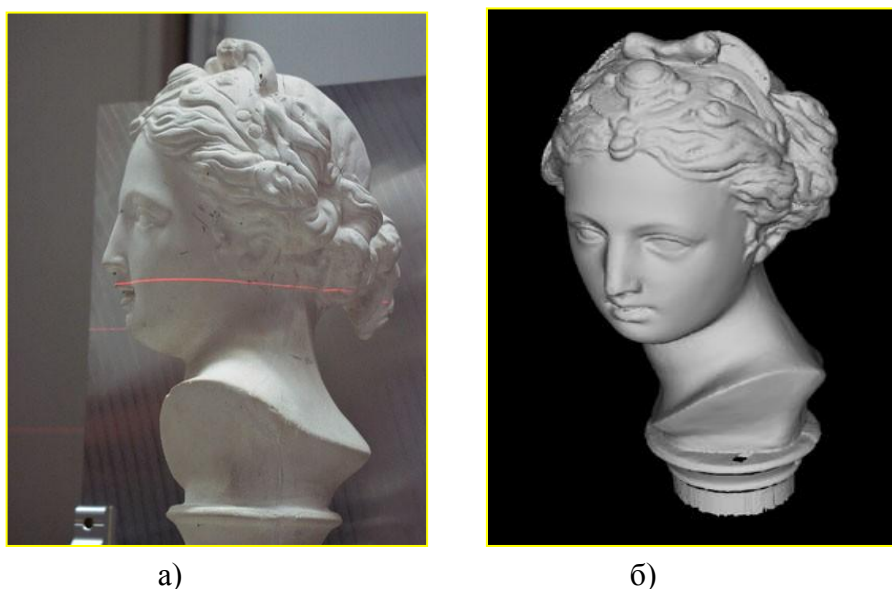


Рисунок 1.1 — Мармурова статуя (а) і її віртуальна копія (б), отримана за допомогою методу тривимірного лазерного сканування

У сучасних лазерних сканерах зазвичай використовуються імпульсні YAG:Nd лазери (типові вихідні параметри: довжина хвилі випромінювання — 0,53 мкм, тривалість імпульсу 0,25 нс, середня потужність — близько 1 мВт).

Точність вимірювань лазерними сканерами залежить від розмірів об'єкта і може складати від 50 мкм (при зйомці об'єктів розміром близько  $50 \times 50 \text{ см}^2$  з відстані до 1 м) до 1 мм (при зйомці об'єктів розміром до  $50 \times 50 \text{ м}^2$  з відстані до 100 м).

## 2 ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНОГО ДАЛЕКОМІРА

Для дослідження питання максимальної дальності в космосі імпульсного далекоміра, як одного із сучасних лазерних далекомірів, було проведено моделювання для джерел випромінювання: твердотільний ербієвий лазер ( $\lambda = 1,54$ ), твердотільний YAG: Nd лазер ( $\lambda = 1,06$ ) і газовий лазер CO<sub>2</sub> ( $\lambda = 10,6$ ).

Максимальну дальність лазерного далекоміра можна оцінити за формулою:

$$D_{\max} = \tau_a \sqrt{\frac{W_l S_{np} \tau_{nep} \tau_{np} \rho K}{4\pi W_{\min}}}, \quad (2.1)$$

де  $W_l$  — імпульсна енергія випромінювання лазера (Дж);

$\tau_a$  — коефіцієнт пропускання всієї товщі атмосфери для випромінюваної лазером довжини хвилі, що залежить від зенітного кута і метеорологічних умов в момент вимірювання;

$S_{np}$  — геометрична площа апертури, яка щороку збирає відбите випромінювання приймальні оптичної системи;

$W_{\min}$  — мінімальна допустима енергія сигналу на фотодетектор (Дж);

$\tau_{nep}$  — коефіцієнт передачі колімуючої оптичної системи лазерного передавача;

$\tau_{np}$  — коефіцієнт передачі приймальні оптичної системи;

$\rho K$  — коефіцієнт, що характеризує спрямованість відбитого випромінювання.

Коефіцієнт, що характеризує прозорість атмосфери, залежить від довжини хвилі і метеорологічних умов.

Мінімальна допустима енергія сигналу приймального джерела  $W_{\min}$  варіює залежно від довжини хвилі і типу лазера. Для розрахунків були підібрані лазери з близьким  $W_{\min}$ , вони відображені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Таблиця під певний вид лазера

Лазер	Довжина хвилі $\lambda$ , мкм	Мінімальна допустима енергія $W_{\min}$ , Дж
Твердотільний ербієвий	1,54	$10^{-15}$
Твердотільний YAG:Nd	1,06	$10^{-15}$
Газовий CO <sub>2</sub>	10,6	$10^{-15}$

Користуючись формулою (2.1) був проведений власний розрахунок максимальної дальності. Використовувалися наступні фіксовані величини:  $S_{np} = 0,785$ ;  $\tau_{nep} \cdot \tau_{np} = 0,5$ ;  $W_{\min} = 10^{-15}$  Дж; для орієнтовних розрахунків, коли випромінювання падає приблизно по нормалі до поверхні, можна прийняти, що добуток  $\rho K$  коливається від 0,1 до 2, в даному розрахунку  $\rho K = 0,5$ .

Для твердотільного ербієвого лазера, враховуючи параметри  $\tau_a = 0,87$  та  $W_{\min} = 6$  Дж, отримана дистанція:

$$D_{\max 1} = 0,87 \sqrt{\frac{6 \cdot 0,785 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{4\pi \cdot 10^{-15}}} = 8422000 \text{ м} = 8422 \text{ км}.$$

Для твердотільного YAG:Nd лазера, враховуючи параметри  $\tau_a = 0,86$  та  $W_{\min} = 5$  Дж, отримана дистанція:

$$D_{\max 2} = 0,86 \sqrt{\frac{5 \cdot 0,785 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{4\pi \cdot 10^{-16}}} = 7599000 \text{ м} = 7599 \text{ км}.$$

Для газового лазера  $\text{CO}_2$ , враховуючи параметри  $\tau_a = 0,89$  та  $W_l = 80$  Дж, отримана дистанція:

$$D_{\max 3} = 0,89 \sqrt{\frac{80 \cdot 0,785 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{4\pi \cdot 10^{-15}}} = 31460000 \text{ м} = 31460 \text{ км}.$$

На рис. 2.1 показана залежність максимальної дистанції від  $W_l$ .

З графіка видно, що за рахунок високої  $W_l$ , показник максимальної дальності зростає. Найкраще це показано на прикладі з  $\text{CO}_2$ -лазером ( $D_{\max 3}$ ), максимальна дальність якого приблизно в 4 рази перевищує максимальну дальність YAG: Nd ( $D_{\max 2}$ ) і ербієвого ( $D_{\max 1}$ ) лазерів, за рахунок високого показника енергії імпульсу.

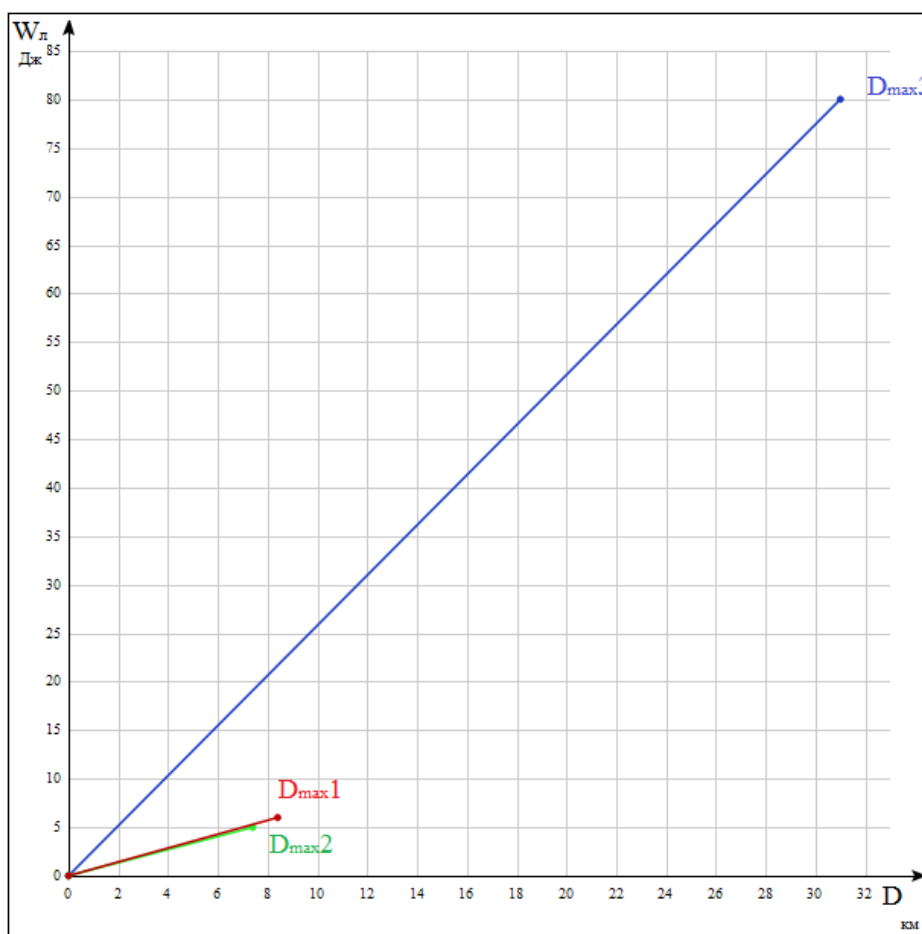


Рисунок 2.1 — Графік залежності максимальної дистанції від енергії імпульсу випромінювання лазера

## ВИСНОВКИ

В атестаційній роботі досліджені конструкційні особливості, можливості і характеристики лазерних імпульсних далекомірів. Головні переваги імпульсних лазерних далекомірів складаються в можливості реалізації високих значень таких основних характеристик: дальності дії, яка визначається високою енергетикою генеруємих світлових потоків; точності визначення дальності, пов'язаної з зондувальними імпульсами короткої тривалості; просторової селективності, зумовленої низькою розбіжністю лазерного променя.

Проведено дослідження джерел похибок визначення дистанцій. Найбільший внесок в помилки вимірювань імпульсним лазерним далекоміром вносить похибка атмосфери. Значно зменшити величину атмосферної похибки досить важко. Виходом з цієї ситуації є використання технології ЛДС четвертого покоління — двохвильового методу локації.

Розглянуті скануючі лазерні далекоміри, їх принципи сканування та практичне застосування тривимірного лазерного сканування.

Проведено дослідження максимальної дальності імпульсного далекоміра. В ході нього визначено, що з трьох лазерів: твердотільний ербієвий лазер ( $\lambda = 1,54$  мкм), твердотільний YAG:Nd лазер ( $\lambda = 1,06$  мкм), CO<sub>2</sub> лазер ( $\lambda = 10,6$  мкм), які виступають як джерело випромінювання, найбільшою максимальною дальністю володіє газовий CO<sub>2</sub> лазер.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Васильев В. П. Лазерная дальнометрия. Москва: Радио и связь, 1995. 256 с.
2. Барышников Н. В. Приемо-передающие устройства лазерных локационных изображающих систем. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 84 с.
3. Карасик В. Е. Лазерные системы видения. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 352 с.
4. Degnan J. J. Satellite laser ranging: Current status and future prospects // IEEE Trans. 1985. Vol. 23, № 4. P. 398 — 413.
5. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной. М.: Наука, 1967. 548 с.
6. Мещеряков Н. А. Компактный лазерный излучатель мощных импульсов наносекундной длительности для локации // Вестник СГГА. 2001. № 6. С. 169.
7. Кравченко Н. И. Расчет дистанции до ИСЗ // Зарубежная радиоэлектроника. 1985. №12. С. 59.
8. Могильницкий Б. С. Параметры вращения Земли: технологии обработки данных. Конгресс «ГЕО-Сибирь–2005» // Вестник СГГА, 2005. С. 166.
9. Гамал К. Определение погрешности расстояния до ИСЗ // Квантовая электроника. 1978. №11. С. 2428.
10. Abshire J // IEEE Transactions on Magnetics. 1985. Vol. 23, №4. P. 271.
11. Pantzer D. Absolute distance measuring // Research in Optics. 1988. Vol. 15, №2. P. 12—13.
12. Rielek W. Publ. Astron. Inst. Czechosl. Acad. Ski. 1984. №58. P. — 58.
13. Мещеряков Н. А. Оптимизация методов приема и обработки информации в спутниковых ЛДС // Измерит. Техника. 2001. №3. С. 12.

14. Мачехін Ю.П., Гнатенко О.С., Курський Ю.С., Семенець В.В., Неофітний М.В. М37 Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 1. Лазерна інформаційно-вимірювальна техніка для задач військового призначення. Харків: ФОП Панов А.М. 2019. 156 с.

15. Шандыбина Г. Д., Парфенов В. А. Информационные лазерные технологии: учебное пособие. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2008. 107 с.

16. Chaikovsky A.P. Retriving atmospheric aerosol parameters on the base of multiwavelength lidar and sun sky-scanning radiometer data // Reviewed and revised papers at the twenty-first International Laser radar Conference. 2002. P. 593—594.