

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем  
(повна назва)

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

рівень вищої освіти другий (магістерський)

**АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНОГО ЛІДАРУ**  
**НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРУ КОНЦЕНТРАЦІЇ АТМОСФЕРНИХ ДОМІШОК**  
(тема)

Виконав:

студент ІІ курсу, групи IPTm-22-1  
Лебединський В.М.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Освітня програма Інформаційні радіотехнології  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Зарудний О.А.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

В.о. зав. кафедри Зарудний О.А.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіо технологій і технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва)

Освітня програма Радіоелектронні пристрой, системи та комплекси \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпись)

«\_\_\_\_\_» 2024 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Лебединському Віталію Михайловичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз впливу параметрів резонансного лідару на точність вимірювання концентрації атмосферних домішок

затверджена наказом університету від 20.10.2023 р. № 1221Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 25 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

літературні джерела та електронні ресурси за темою кваліфікаційної роботи

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

Огляд лідарних технологій дослідження навколошнього середовища.

Методи лідарних досліджень атмосфери та лідарне рівняння

Результати аналізу та розрахунки параметрів резонансного лідару

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Титульний слайд; Властивості системи LiDAR; Принцип дії лідару; Метод резонансного

розсіювання; Monoстатична конфігурація лідара; Лідарне рівняння; Перетин розсіювання та

ефективна енергія випромінювання; Резонансна лінія НА з доплерівським розширенням;

Перетин поглинання атому натрія; Залежність перетину від ширини спектра

випромінювання; Результати чисельних розрахунків перетину розсіювання; Чисельні

розрахунки для гаусових форм спектра; Отримання остаточних виразів з інтегрування по

спектру; Висновки

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	доц. Зарудний О.А.		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення зі завданням. Уточнення ТЗ	01.09.2023	вик.
2	ОГЛЯД ЛІДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДОСЛІДЖЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	18.09.2023-29.09.2023	вик.
3	МЕТОДИ ЛІДАРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АТМОСФЕРИ ТА ЛІДАРНЕ РІВНЯ	30.09.2023-20.10.2023	вик.
4	РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ТА РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНОГО ЛІДАРУ	21.10.2023-30.10.2023	вик.
5	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту у ЕК	31.10.2023-15.12.2023	вик.
6	Представлення роботи на кафедру	25.01.2024	вик.

Дата видачі завдання 20 жовтня 2023 р.

Студент \_\_\_\_\_ Лебединський В. М..  
 (підпис) ( прізвище, ініціали)

Керівник роботи доц. Зарудний О.А.  
 (підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська атестаційна робота складається з пояснівальної записки, котра містить: 74 сторінок тексту, 20 рисунків, 2 таблиці, 21 джерел посилання та 2 додатка.

### ФЛУОРЕСЦЕНЦІЯ, ЛІДАР, РОЗСІЮВАННЯ, ЛАЗЕР, ЗОНДУВАННЯ

В роботі аналізуються можливості методу і радіоелектронної (лазерної) апаратури резонансної локації домішок мезосфери та розглянуто можливості лазерного дистанційного зондування на основі лідарів як ефективного методу дослідження навколоішнього середовища. Викладено принципи побудови систем лідарного моніторингу та типи роботи лазерних далекомірів. Проведено аналіз систем лідарного зондування атмосферного середовища.

Описується можливість дистанційного зондування атмосфери за допомогою лідара, що дозволяє отримувати коефіцієнти зворотного розсіювання і екстинкції аерозолю в діапазоні довжин хвиль від 355 до 1064 нм. Оцінюються параметри багато хвильового лідара для моніторингу аерозолю в висотному діапазоні 1-10 км.

Робота присвячена спеціальним питанням дистанційного дослідження атмосфери за допомогою резонансного лідaru на основі ефекту резонансної флуоресценції в парах натрію.

## ABSTRACT

The master's degree work consists of an explanatory note containing pages of text, figures, tables, sources, and appendices.

### FLUORESCENCE, LIDAR, DIFFUSION, LASER, SENSING

The paper analyses the capabilities of the method and radio-electronic (laser) equipment for resonant location of mesospheric impurities and considers the possibilities of laser remote sensing based on lidar as an effective method for studying the environment. The principles of constructing lidar monitoring systems and the types of operation of laser range finders are outlined. The analysis of lidar sounding systems of the atmospheric environment is carried out.

The possibility of remote sensing of the atmosphere using a lidar is described, which makes it possible to obtain aerosol backscattering and extinction coefficients in the wavelength range from 355 to 1064 nm. Parameters of a multi-wave lidar for aerosol monitoring in an altitude range of 1-10 km are estimated.

The work is devoted to special issues of remote sensing of the atmosphere using a resonant lidar based on the effect of resonant fluorescence in sodium vapor.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ОГЛЯД ЛІДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДОСЛІДЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА .....	11
1.1 Устрій та принцип дії лідaru .....	11
1.2 Принцип роботи лідара для атмосферних досліджень.....	13
1.3 Типова структурна схема лідару .....	14
1.4 Лазери, що використовуються в лідарах .....	16
1.5 Оптичні схеми об'єктивів лідарів.....	18
1.5.1 Об'єктив Ньютона .....	21
1.5.1.1 Багатохвильовий раманівський лідар MRL-400 (рис. 1.5) .....	22
1.5.1.2 Багатохвильовий аерозольний лідар PL-200 (рис. 1.6).....	23
1.5.2 Об'єктив Касегрена.....	24
1.5.2.1 Стационарний лідарний комплекс МВЛ-60 (рис. 1.8).....	25
1.5.2.2 Багатохвильовий лідар з раманівськими каналами (рис. 1.9) .....	26
1.5.3 Об'єктив Грекорі.....	27
1.6 Методи вимірювання відстані до об'єкту.....	28
1.6.1 Тріангуляційний далекомір.....	28
1.6.2 Фазовий далекомір.....	29
1.6.3 Імпульсний далекомір.....	30
1.7 Відмінності побудови лідарів для моніторингу атмосфери .....	31
2 МЕТОДИ ЛІДАРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АТМОСФЕРИ ТА ЛІДАРНЕ РІВНЯННЯ.....	33
2.1 Методи лідарних досліджень атмосфери .....	33
2.1.1 Метод диференційного поглинання (ДП).....	33
2.1.2 Метод диференційного поглинання та розсіювання (ДПР).....	34
2.1.3 Метод аерозольного розсіювання .....	34
2.1.4 Метод Релеєвського розсіювання .....	35
2.1.5 Метод спонтанного комбінаційного розсіювання (СКР) .....	36

2.1.6 Метод резонансного спонтанного комбінаційного розсіювання (РСКР) .....	37
2.1.7 Метод резонансного розсіювання.....	38
2.1.8 Молекулярна резонансна флуоресценція.....	38
2.1.9 Порівняльний аналіз лідарних методів дослідження атмосфери.....	40
2.2 Лідарне рівняння .....	44
2.3 Лідарна апаратура і методика резонансного зондування домішок.....	48
3 Аналіз факторів, що впливають на точність вимірювання атмосферних домішок... 3.1 Характеристика і природа домішкових шарів у верхній атмосфері.....	53
3.2 Особливості конструкції резонансного лідaru .....	54
3.3 Аналіз рівняння оптичної локації стосовно резонансного лідaru .....	56
3.4 Аналіз спектра поглинання атома і вплив ширини спектра випромінювання на ефективний перетин розсіювання.....	59
3.5 Оцінка гранично допустимих значень енергії випромінювання передавача.....	66
ВИСНОВКИ.....	72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....	73

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- БВЧМ – безперервне випромінювання з частотною модуляцією
- ДІ – дискримінатор імпульсів
- ДП – диференціальне поглинання
- ДПР – диференціальне поглинання і розсіяння
- ІДЛ – імпульсний детектор лазеру
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- КР – комбінаційне розсіювання
- ЛА – лідарна апаратура
- ЛЛС – лазерна локаційна система
- ЛПК – лампи з порожнім катодом
- ОС – оптична схема
- РСКР – резонансне спонтанне комбінаційне розсіювання
- СКР – спонтанне комбінаційне розсіювання
- ФЕП – фотоелектронний помножувач

## ВСТУП

Можливість дистанційно визначати обрану характеристику повітряного середовища на будь-якому напрямку лазерного променя і отримувати самі різноманітні відомості про властивості атмосфери на різних висотах завжди стимулювали інтенсивний розвиток методів висотного зондування.

Істотне поліпшення технології LiDAR сталося в 1980-х роках, коли інфрачервоні лазерні системи стали широко використовуватися для складання карт будівель і місцевості за допомогою літаків. Ці ж методи дозволили виміряти, наприклад, глибину океану і знайти приховані поселення Майя.

За рахунок реєстрації не тільки часу, який потрібен лазерному променю для повернення, а й кута, під яким він відбивається, дані LiDAR можна комбінувати з іншою інформацією для отримання дуже точних тривимірних карт. Професійні системи LIDAR часто об'єднуються з пристроями GPS. Деякі з сучасних датчиків LiDAR настільки чутливі, що можуть виявляти забруднюючі речовини в повітрі, або здатні контролювати потік трафіку в аеропорту. Загальним для всіх таких датчиків є те, що вони засновані на балансі збору і аналізу даних.

Завдяки активному розвитку технологій і вдосконалення методів лазерного зондування лідарні методи досліджень використовуються для самих різних задач, що допомагають поліпшити екологічну ситуацію в світі, якість життя, а також сприяє накопиченню знань про навколишній світ.

Серед існуючих методів лідарних досліджень атмосфери окремо можна виділити резонансний метод, що має виключно велику чутливість і дозволяє, наприклад, вимірювати концентрацію домішок атмосфери порядку одного атому в кубічному сантиметрі на висоті 100 км [1].

Для реалізації резонансного методу досліджень необхідно мати передавач з надзвуковою смugoю випромінювання, сумісну з шириною спектру

досліджуваної домішки, а також систему точного настроювання на резонансну довжину хвилі.

При цьому виникає ряд проблем, пов'язаних з апаратурною реалізацією методу, таких як:

- реальний спектр будь-якої домішки зазвичай є досить складним, тому ширина спектру випромінювання має бути узгоджена зі спектром конкретної атмосферної домішки;
- звуження спектру випромінювання передавача для посилення ефекту резонансної взаємодії з атомами (молекулами) домішок, зазвичай, супроводжується зменшенням енергії його випромінювання [2];
- зменшення смуги частот випромінювання ускладнює реалізацію системи настроювання на необхідну довжину хвилі.

Метою роботи є підвищення ефективності резонансного лідару.

У зв'язку з цим в магістерській роботі вирішувались наступні завдання:

- огляд лідарних технологій дослідження навколошнього середовища;
- огляд методів та варіантів побудови апаратури для лідарних досліджень атмосфери;
- аналіз впливу спектральних та енергетичних характеристик випромінювання резонансного лідару на точності вимірювань їхньої концентрації.

# 1 ОГЛЯД ЛІДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДОСЛІДЖЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

## 1.1 Устрій та принцип дії лідaru

Лідар – це технологія, яка використовує активні оптичні системи для отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти, використовуючи властивості відбиття та розсіювання світла в прозорих та напівпрозорих середовищах. Як оптичний локатор, лідар використовується для зондування повітряних і водних середовищ, включаючи дистанційне отримання інформації про тверді об'єкти.

Створена у 1960-х роках, технологія лідaru спочатку призначалася для відстеження супутників та військових цілей, ідея якої базувалася на використанні світла для визначення положення об'єктів. Вимірюючи час подорожі світла до об'єкта та його повернення, можна точно визначити положення об'єкта.

Оптичний датчик LiDAR (Light Identification Detection and Ranging) використовує електромагнітні хвилі інфрачервоного діапазону для визначення відстані та швидкості об'єкта перед собою. Лідар може використовуватися для визначення часток вологи в атмосфері, а також ліній дорожньої розмітки. Як альтернатива автомобільному радару, лідар вражає своїми перевагами: компактність, широкий кутовий дозвіл, значний радіус дії та доступність за невисокою вартістю. Інфрачервоні промені, які використовує лідар, доведено є безпечними для людського зору.

Робота лідара ґрунтуються на використанні інфрачервоного світлодіода або лазера як активного джерела, що випромінює промені в середовище. Поруч з випромінювачем розташований світлочутливий приймач, який реєструє відбиту інформацію. (рис. 1.1).

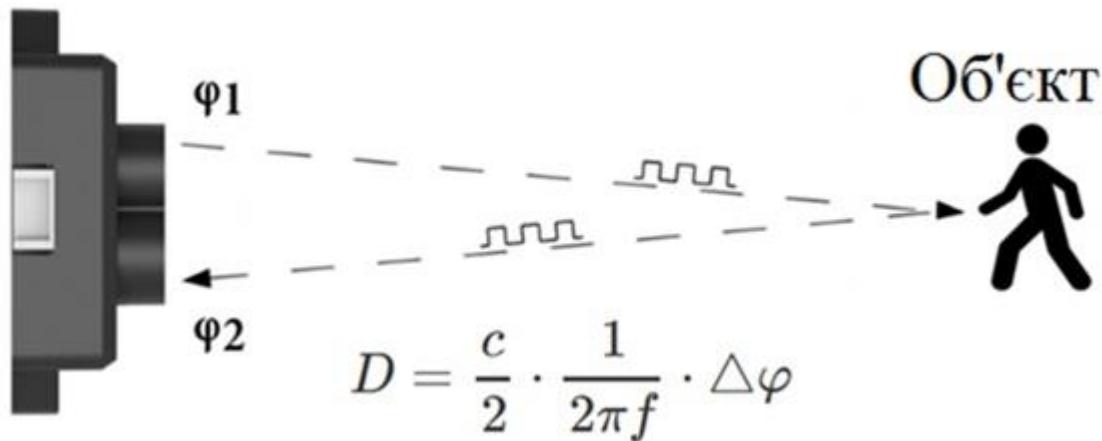


Рисунок 1.1 — Основа визначення відстані до об'єкта за допомогою лідара.

На рис. 1.1 зазначені наступні параметри:  $D$  – вимірювання відстаней;  $c$  - швидкість світла в оптичному середовищі;  $f$ - частота скануючих імпульсів;  $\Delta\varphi$  - фазовий зсув

Після вимірювання часу, який займає повернення відбитої хвилі, ми можемо визначити відстань до об'єкта в полі зору датчика, що відповідає принципу часопролітного вимірювання, або Time of flight (ToF) англійською.

Однак лазерний радар виявляється чутливим до змін рельєфу дороги, оскільки промені можуть відбиватися від поверхні дороги, спотворюючи отриману інформацію. Також, ефективність лідара падає в умовах поганої видимості, таких як дощ, сніг, туман, і при забрудненні датчика.

Лідари визначаються популярністю через переваги, які забезпечують їхні лазери:

- когерентність випромінювання;
- коротка довжина хвилі, що призводить до малих втрат через розбіжність;
- миттєва потужність випромінювання.

Цей комплекс властивостей робить лідари незамінними на відстанях від сотень метрів до кількох кілометрів.

## 1.2 Принцип роботи лідара для атмосферних досліджень

Лазер надсилає імпульсне випромінювання в атмосферу. Після цього, розсіяне атмосфорою в зворотному напрямку, випромінювання збирається телескопом і реєструється фотоприймачем. Подальше оцифрування сигналів відбувається (рис. 1.2).

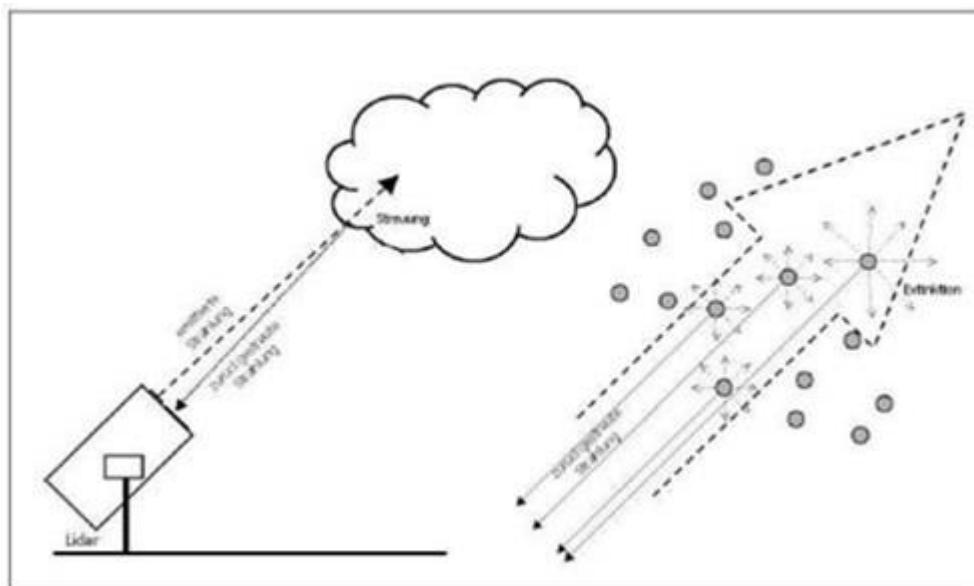


Рисунок 1.2 — Атмосферний лідар імпульсної дії

Лідар випромінює короткі лазерні імпульси на поверхню об'єкта, і датчик реєструє відбитий світловий сигнал, що дозволяє вимірюти час, необхідний для повернення імпульсу. Світло рухається з постійною і відомою швидкістю, завдяки чому лідар точно визначає відстань до цілі.

Існують дві основні категорії імпульсних лідарів: мікроімпульсні та високоенергетичні системи. Мікроімпульсні лідарі, працюючи на потужній комп'ютерній техніці з великими обчислювальними можливостями, класифікуються як «безпечні для очей», що дозволяє їх використовувати без особливих запобіжних заходів.

Лідари з великою енергією імпульсу в основному застосовуються для дослідження атмосфери, де вони часто використовуються для вимірювання

різних параметрів атмосфери, таких як висота, нашарування і щільність хмар, властивості частинок хмари, температура, тиск, вітер, вологість і концентрація газів в атмосфері.

### 1.3 Типова структурна схема лідару

Лідарі зазвичай мають три основні компоненти (рис. 1.3):

- передавальна частина;
- приймальна частина;
- система управління.



Рисунок 1.3 — Принципова схема лідару: передавальна частина А, приймальна частина Б, система управління В

Лідари з великою енергією імпульсу в основному застосовуються для дослідження атмосфери, де вони часто використовуються для вимірювання різних параметрів атмосфери, таких як висота, нашарування і щільність хмар, властивості частинок хмари, температура, тиск, вітер, вологість і концентрація газів в атмосфері.

Лідар – це складний технічний пристрій, і його передавальна частина включає в себе ключові компоненти для генерації та управління лазерним пучком. Основним елементом є лазер та оптична система, які разом формують вихідний лазерний промінь, керуючи його розміром та розбіжністю.

У більшості конструкцій лідарів використовується лазер як джерело випромінювання. Цей лазер генерує короткі імпульси високої інтенсивності світла. Частота імпульсів або їхня модуляція визначається так, щоб інтервал між двома послідовними імпульсами був не менше за час відгуку від виявлених цілей.

Вибір довжини хвилі лазера залежить від функціональності та вимог до безпеки та конфіденційності пристрою. Популярними є Nd: YAG-лазери, і різні довжини хвиль використовуються для різних цілей:

- 1550 нм – інфрачервоне випромінювання, невидиме для ока людини і приладів нічного бачення. Очі не можуть сфокусувати ці хвилі на сітківці, що робить їх менш травматичними, але висока потенційна небезпека для очей.
- 1064 нм – близьке інфрачервоне випромінювання, невидиме для ока, але виявляється приладами нічного бачення.
- 532 нм – зелене випромінювання неодимового лазера, ефективно проникає через воду.
- 355 нм – близьке ультрафіолетове випромінювання.

Приймальна частина лідара складається з об'єктива (телескопа), спектральних та/або просторових фільтрів, поляризованого елемента і фотодетектора. Випромінювання, що відображається або розсіюється від об'єкта, концентрується приймальною оптикою (телескопом), а потім проходить через аналізатор спектру. Цей пристрій призначений для виділення інтервалу довжин хвиль, на якому проводяться спостереження, та, отже, для відсічення фонового випромінювання на інших довжинах хвиль.

Аналізатор може бути складним, налаштовуваним моно- або поліхроматором, або включати набір вузькосмугових фільтрів, включаючи фільтр для відсічення випромінювання на довжині хвилі лазерного передавача.

Випромінювач і приймальний блок можуть бути віддалено розташовані або виконані в єдиному блоці, що є звичайним в сучасних конструкціях. Оси випромінювача і приймача можуть бути суміщеними (коаксіальна схема) або розташованими окремо (біаксіальна схема).

Система управління виконує різноманітні завдання:

- контроль режиму роботи лідара;
- управління частотою зондуочого випромінювання лазера;
- вимірювання енергії вихідного і прийнятого лазерного пучка на обох частотах;
- обробка результатів, включаючи отримання спектральних характеристик атмосфери, визначення наявності та концентрації домішок на основі даних комп’ютера "спектральних портретів" молекул;
- управління системою наведення лідара на об’єкт дослідження.

#### 1.4 Лазери, що використовуються в лідарах

Лазери, спроектовані для дистанційного зондування, викликають особливий інтерес через їхню здатність генерувати спектрально обмежені імпульси випромінювання наносекундної тривалості з високою потужністю та невеликою кутовою розбіжністю. Таблиця 1 [2] вказує на основні види лазерів, які переважно використовуються для зондування атмосфери.

Для оптимального вибору конкретного типу лазера та його конструкції необхідно враховувати умови застосування лідарної системи. Наприклад, при зондуванні на фіксованій довжині хвилі або в обмеженому спектральному діапазоні використання серійних лазерів або джерел когерентного

випромінювання широкого призначення може бути доцільним для різних спектроскопічних досліджень.

У випадку лідарних систем, призначених для проведення широкоспектральних досліджень, випромінювач може бути створений на основі об'єднання декількох окремих лазерів. Проте таке технічне рішення може виявитися неефективним у плані експлуатаційних показників через громіздкість та неспритність в роботі випромінювачів.

У випадках, коли вимагаються особливі характеристики та конструкція лазера (наприклад, для лідарів, які використовуються для багатокомпонентного газового аналізу, мобільних лідарів та інших спеціалізованих застосувань), розробляються спеціальні пристрої, які суттєво відрізняються від звичайних квантових генераторів за технічними характеристиками та конструкцією.

Використання генерації вищих гармонік, параметричної конверсії та комбінаційного зсуву лазерів, які створюються на основі барвників, розширяє можливості застосування лазерів. Застосування модуляції добротності дозволяє досягати пікової потужності від 1 до 40 МВт при тривалості імпульсу від 10 до 30 нс. Оптимальні для досліджень є мінімальні кути розбіжності пучка, при частоті повторення імпульсів близько 10 Гц.

Подвоєння або потроєння частоти досягається за рахунок використання відповідних нелінійних кристалів. Ефективність перетворення залежить від оптичної якості кристалу, довжини хвилі, інтенсивності та ступеня когерентності лазерного пучка. Верхня межа ККД перетворення може досягати 70% [3].

Таблиця 1 — Лазери для зондування атмосфери

Вид взаємодії	Тип лазера і активного середовища	Довжина хвилі, мкм
Зондування атмосферного аерозолю		
AP і MP	Неодимове скло	1,060 і гармоніки
	Алюмоітріевий гранат	1,064 і гармоніки
	Рубін	0,694 і 0,347 (2-га гармоніка)
	Барвники	0,26—1,1
	СО <sub>2</sub> -лазери	9—11
	Пари міді	0,510 і 0,578
	Ексимерні лазери*	0,2—0,35
Зондування гідрозолю		
AP і MP	2-га гармоніка лазера на неодимовому склі	0,530
	2-га гармоніка лазера на алюмоітріевому гранаті	0,532
	Пари міді	0,510 і 0,578
Аналіз газового складу атмосфери		
KP	Гармоніки випромінювання лазерів на неодимовому склі і алюмоітріевому гранаті	0,26; 0,35; 0,53
	Рубін	0,347 (2-га гармоніка)
	Азотні лазери	0,337
	Ексимерні лазери*	0,2—0,35
РР Резонансне KP РП	Барвники	0,26—1,1
	Ексимерні лазери*	0,2—0,35
	Рубін	0,694
	СО <sub>2</sub> -лазери	9—11
	Барвники	0,26—1,1
Лазери на центрах фарбування в іонних кристалах*		

## 1.5 Оптичні схеми об'єктивів лідарів

Задача лідара полягає в перехопленні зворотного сигналу від об'єкта, його фільтрації (просторово та спектрально) та направленні на чутливий майданчик фотоприймача. Цей процес має відбуватися максимально ефективно, мінімізуючи втрати корисного світлового сигналу, зібраного об'єктивом, та максимізуючи пригнічення всіх завад.

Лазер випромінює пляму на об'єкті, розмір якої визначається розбіжністю пучка  $2\theta$  та відстанню до об'єкта  $R$ :  $D = 2Rtg(2\theta)$ . Об'єктив збирає частину відбитого та розсіяного в зворотному напрямку випромінювання світла. При великих відстанях промені від точки майже паралельні один одному. Основним завданням об'єктива є зібрати достатньо світла від плями та спроектувати її на фотоприймач. Таким чином, основними параметрами об'єктива є світлозбиральна площа, фокусна відстань та поле зору.

Для космічних лідарів, які працюють на великих відстанях (сотні кілометрів), необхідно використовувати об'єктиви з великим діаметром, наприклад, від 1 до 3 метрів або більше, для ефективного збору світла. Це особливо важливо при роботі в режимах комбінаційного розсіювання або диференціального поглиблення. Діаметр  $d$  та фокусна відстань  $f$  визначають світлосилу об'єктиву (відносний отвір  $d/f$ ). Чим світлосильніша система, тим менше розмір зображення, яке вона формує. Поле зору об'єктива визначається кутом, під яким промінь від крайньої точки плями проходить через центр вхідної зіниці об'єктива.

Розмір зображення, еквівалентна фокусна відстань (з урахуванням додаткових перепроектованих елементів у спектральному блоці приймача) і кут поля зору взаємозв'язані за допомогою співвідношення  $a = 2f \tg \alpha$ . Це співвідношення дозволяє визначити параметри конкретних схем та вибрати відповідні елементи. У багатьох випадках пляма проектується не безпосередньо на фотоприймач, а на площину польової діафрагми (первинне зображення), яка обмежує поле зору об'єктива.

Регулюючи розміри польової діафрагми, можна змінювати ефективний розмір плями, що проектується на фотоприймач. Іншими словами, це дозволяє змінювати просторову роздільність вимірювань і зменшувати шумову засіку від багаторазово розсіяного світла. Перепроектування первинного зображення також є способом боротьби з розсіяним світлом, що потрапляє в об'єктив.

Коли польова діафрагма має максимальний розмір, відбувається взаємна юстировка лазера і приймального об'єктива лідара (досягнення максимального прийнятого сигналу). У вимірах розмір діафрагми має мінімальне значення. Зазвичай діафрагма представлена у формі ірису або диска з отворами різного діаметру. Оскільки лідар працює з віддаленими об'єктами, об'єктив повинен формувати зображення практично з нескінченності на кінцеву відстань у фокальній площині. Таким чином, для лідарів використовують телеоб'єктиви. Оптичний розрахунок телеоб'єктива проводиться з урахуванням мінімізації

абераційного розмиття краю зображення, що повинно бути мінімальним або прийнятним для уникнення світлових втрат.

У випадку лідарів, таких як далекоміри, сканери або батиметрії, діаметр об'єктива зазвичай невеликий (від 15 до 150 мм), і тому для їх конструкції застосовують лінзові об'єктиви. Різновиди об'єктивів, що використовуються в лідарах, включають:

- Дзеркальні (рефлекторні) об'єктиви, що використовують дзеркальні світлозбиральні елементи.
- Дзеркально-лінзові (катадіоптричні) об'єктиви, де оптичні елементи складаються як з дзеркал, так і з лінз. Важливо відзначити, що у таких системах лінзи можуть бути порівняно великими за розміром і служити для корекції зображення, створеного головним дзеркалом.

Дзеркала в таких системах можуть бути виконані в легкій формі, що є важливим аспектом для космічних систем. Дзеркальні системи лідарів будується за стандартними схемами телескопів, такими як схеми Ньютона, Грегорі та Касегрена. Дзеркальні системи завжди включають центральне екранування, навіть у схемі Ньютона, де приймач розташований у фокусі на осі. При обмежених полях зору в одиниці кутових секунд і невеликих відносних отворах ( $d/f'$  менше 1:10), у схемі Ньютона замість параболоїда часто використовується сфера, переважно з міркувань економії. З урахуванням невисоких вимог до якості зображення (необхідно лише зібрати енергію), іноді можна замінити вторинне гіперболічне дзеркало на сферичне. Також можливі варіанти схеми Кассегрена з головним сферичним дзеркалом і вторинним асферичним дзеркалом високого порядку, що є корисними для космічних лідарів із великими телескопами.

Дзеркальні об'єктиви мають численні переваги порівняно з лінзовими об'єктивами:

- Висока світлосила і роздільна здатність.
- Відсутність хроматичної аберрації у дзеркалах.

- Високий коефіцієнт світлопропускання.
- Досить досконала корекція сферичної аберрації за порівняно нескладної конструкції.
- Дзеркальні системи не містять заломлюючих поверхонь, що робить їх зручними для використання в ІК і УФ областях спектру.

Проте, дзеркальні об'єктиви також мають свої недоліки:

- Складність виготовлення та контролю асферичних поверхонь дзеркал.
- Складність юстирування дзеркальних систем.
- Проблеми, пов'язані з використанням великих дзеркал, такі як вплив погодних умов і необхідність терmostабілізації.
- Велика кома, що зменшує корисне поле системи. Цей недолік можна подолати застосуванням дзеркально-лінзових схем.

### 1.5.1 Об'єктив Ньютона

Схема, яку запропонував Ісаак Ньютон у 1668 році, використовує головне (парabolічне) дзеркало, яке направляє випромінювання на невелике плоске діагональне дзеркало, розташоване близько до фокусу (рис. 1.4). Плоске діагональне дзеркало відхиляє пучок випромінювання за межі труби телескопа, де воно потрапляє на приймальний пристрій.

Схема має мінімальну кількість оптичних елементів, що забезпечує простоту юстування, невисокі вимоги до обробки дзеркал і доступну вартість виготовлення. Головне дзеркало через свій великий розмір вимагає часу для використання при будь-якій зміні температури навколишнього середовища або терmostабілізації. Також необхідне періодичне підстроювання дзеркал, яке може втрачатися під час транспортування та експлуатації. Система не є вільною від аберрації коми.

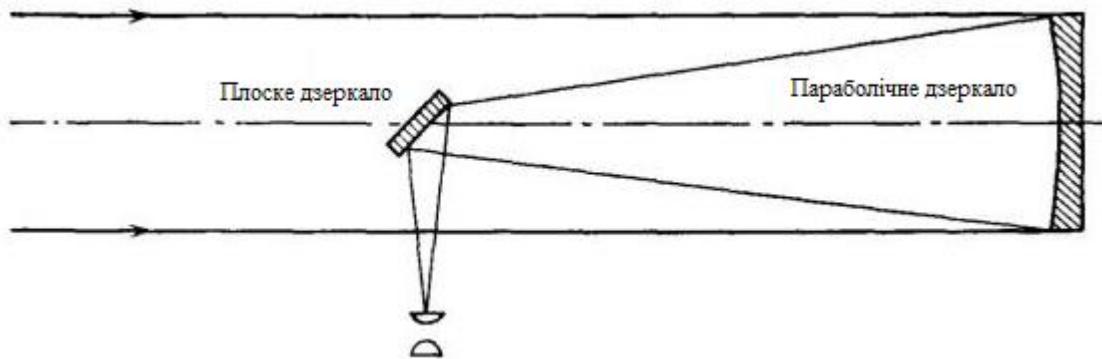


Рисунок 1.4 — Типова структурна схема об'єктиву Ньютона

Об'єктив Ньютона широко використовується в багатьох лідарах. Розглянемо деякі з їх застосувань.

#### 1.5.1.1 Багатохвильовий раманівський лідар MRL-400 (рис. 1.5)

Операція цього лідара [20] ґрунтуюється на явищі комбінаційного розсіювання світла, також відомого як ефект Рамана. Цей процес полягає в непружному розсіюванні оптичного випромінювання на молекулах речовини, будь то тверде, рідке чи газоподібне. При цьому відбувається помітна зміна частоти випромінювання. Спектр розсіяного випромінювання включає спектральні лінії, відсутні у спектрі первинного (збудливого) світла. Розміщення і кількість цих ліній визначається молекулярною структурою речовини.

Лазер, спарований з коліматором, закріплений на приймальному телескопі, що дозволяє здійснювати вимірювання під будь-яким кутом до горизонту.

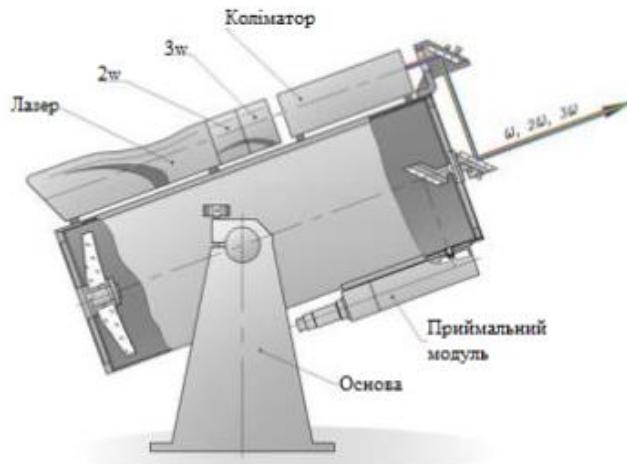


Рисунок 1.5 — Структура лідaru MRL-400

Характеристики системи включають:

- Джерело випромінювання: Nd:YAG лазер Quantel Brilliant з генератором третьої гармоніки.
- Енергія в імпульсі: 300/300/200 мДж при довжинах хвиль 1064/532/355 нм.
- Частота повторення: 10 Гц.
- Зовнішньоосьовий параболічний дзеркальний коліматор із коефіцієнтом збільшення 5 для передавача.
- Діелектричні дзеркальні покриття, забезпечуючи роботу коліматора на довжинах хвиль 355, 532, 1064 нм.
- Телескоп Ньютона з апертурою 400 мм і фокусною відстанню 1200 мм.

#### 1.5.1.2 Багатохвильовий аерозольний лідар PL-200 (рис. 1.6)

Характеристики системи включають:

- Джерело випромінювання: Nd:YAG лазер з генератором третьої гармоніки.
- Енергія при довжині хвилі 355 нм: 70 мДж.
- Частота повторення: 25 Гц.
- Розбіжність пучка: менше 1 мрад.

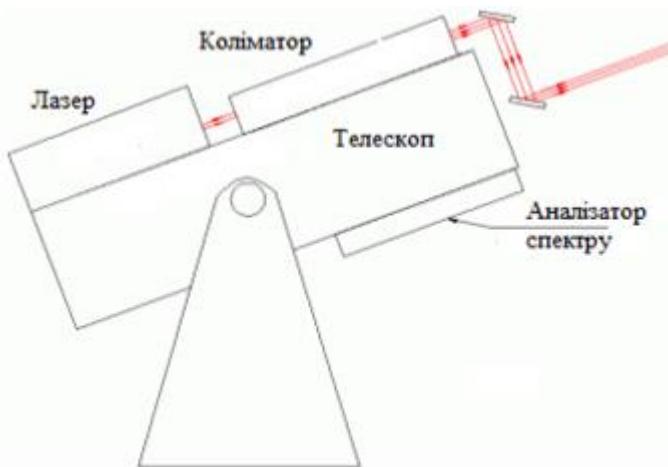


Рисунок 1.6 — Структура лідара PL-200

- Зовнішньоосьовий параболічний коліматор із діелектричним покриттям та коефіцієнтом збільшення 5 призначений для одночасного телескопування випромінюваних довжин хвиль (+1064, 532, 355 нм).
- У лідарі використовується телескоп Ньютона з апертурою 300 мм. Головне дзеркало є параболічним із фокальною відстанню 970 мм.

### 1.5.2 Об'єктив Касегрена

Лорен Касегрен в 1672 році запропонував схему, де головне дзеркало більшого діаметра (увігнуте, в оригінальному варіанті параболічне) відкидає випромінювання на вторинне опукле дзеркало меншого діаметру (зазвичай гіперболічне) (рис. 1.7).

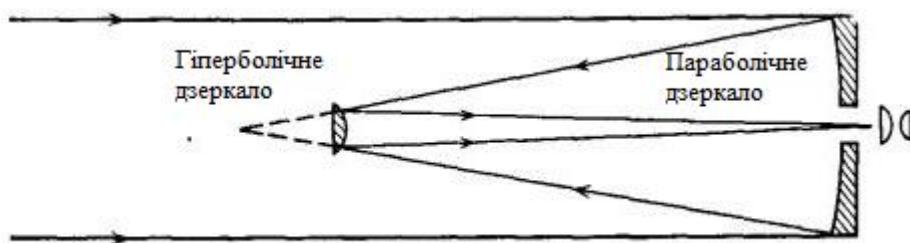


Рисунок 1.7 — Типова структурна схема об'єктива Касегрена

Вторинне дзеркало у схемі Касегрена розташоване між головним дзеркалом і його фокусом, і повна фокусна відстань об'єктива більша, ніж у головного. Об'єктив при тому ж діаметрі і фокусній відстані має майже вдвічі меншу довжину труби і дещо менше екранування, ніж у схеми Грекорі. Традиційний рефлектор Касегрена складний у виробництві (складні поверхні дзеркал - парабола, гіпербола), а також має невиправлену аберрацію коми. Останній недолік виправлений у різних модифікаціях схеми Касегрена. Дзеркальний об'єктив, побудований за схемою Касегрена, користується найбільшою популярністю завдяки поєднанню компактності і можливості отримання великої еквівалентної фокусної відстані. Розглянемо деякі лідари, в

яких використовується приймальний телескоп, побудований за схемою Касегрена.

#### 1.5.2.1 Стaцiонарний лiдарний комплекс МВЛ-60 (рис. 1.8)

Лiдар МВЛ-60 [20] є багатохвильовим і призначений для оперативного дистанцiйного аналiзу характеристик атмосферного аерозолю і хмарних утворень в атмосферi. Вiн використовує лазер, який працює на довжинах хвиль 1064 нм (iнфрачervоний), 532 нм (зелений) i 355 нм (ультрафiолетовий).

Телескоп приймальної антени лiдара МВЛ-60 оснащений дзеркалом дiаметром 60 см, виконаним зазвичай за схемою Ньютона або Касегрена. Це головне параболiчne дзеркало служить основою для обох схем.

У режимi приймання сигналiв лазера за схемою Касегрена вiдбитий сигнал спочатку потрапляє на головне параболiчne дзеркало, а потiм вiдбивається вiд вторинного гiперболiчного дзеркала. Далi вiн проходить через центральний отвiр головного дзеркала i направляється в блок аналiзатора. Там сигнал розподiляється мiж рiзними фотоприймачами i реєструється комп'ютером.



Рисунок 1.8 — Лiдарний комплекс МВЛ-60

У традицiйному астрономiчному режимi за схемою Ньютона плоске дзеркало розташоване на оптичнiй вiсi головного параболiчного дзеркала. Це дзеркало служить для виведення зображення, отриманого головним дзеркалom,

під кутом 90 градусів від вісі телескопа. На цьому фокусі встановлюється окуляр або відеокамера, які дозволяють отримати зображення об'єктів зоряного неба.

#### 1.5.2.2 Багатохвильовий лідар з раманівськими каналами (рис. 1.9)

##### 1. Випромінювач:

- Тип: імпульсний Nd YAG лазер.
- Довжина хвилі: 1064 нм.
- Енергія імпульсу: 100/55/30 мДж.
- Тривалість імпульсу: 10 нс.
  
- Частота посилки імпульсів: 10 Гц.
- Діаметр лазерного пучка (розширений): 50 мм.
- Розбіжність лазерного випромінювання: 0.3 мрад.



Рисунок 1.9 — Багатохвильовий лідар з раманівськими каналами

## 2. Телескоп:

- Тип: Кассегрен.
- Діаметр первинного дзеркала: 300 мм.
- Кут прийому випромінювання: 0.6 - 5 мрад.

## 3. Довжини хвиль:

- Пружне розсіювання: 1064 нм.
- Раманівські довжини хвиль: 387, 407, 607 нм.

### 1.5.3 Об'єктив Грекорі

Схема, яку винайшов Джеймс Грекорі у 1663 році, визначається великимувігнутим параболічним дзеркалом, яке направляє випромінювання на невеликеувігнуте еліптичне дзеркало в центрі. Це еліптичне дзеркало відбиває пучоксвітла до фотоприймального пристрою, розташованого в центральному отворіголовного дзеркала. Застосування вторинного дзеркала подовжує фокуснувідстань, що дозволяє використовувати значні збільшення (див. рис. 1.10).

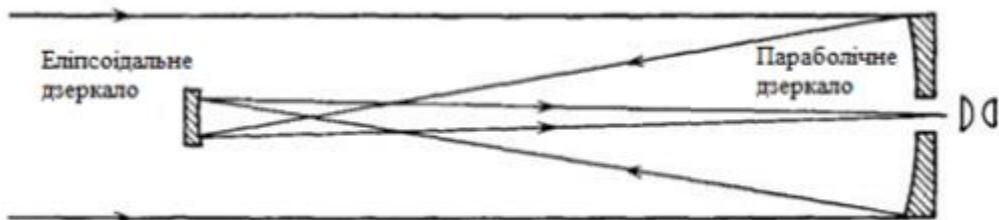


Рисунок 1.10 — Типова структурана схема об'єктиву Грекорі

Відмінність між схемами Грекорі і Касегрена полягає у наявностіпроміжного дійсного зображення в схемі Грекорі. Це зображення дозволяєвикористовувати допоміжну діафрагму для усунення "паразитних" променів, якінеминуче виникають у схемі Касегрена.

При цьому розмір приймального телескопа, побудованого за схемою Грегорі, менший, ніж у телескопа Ньютона, але майже вдвічі більший, ніж у об'єктива Касегрена. Це збільшення розміру пов'язане з використанням вторинного дзеркала, що ускладнює експлуатацію, транспортування та користування загалом.

Незважаючи на ці переваги, схема Грегорі не отримала широкого розповсюдження через більш істотні недоліки при інших рівних параметрах. Вона застосовується лише в обмежених випадках, оскільки схеми Ньютона і Касегрена виявилися більш практичними при однакових умовах.

## 1.6 Методи вимірювання відстані до об'єкту

Лазерні далекоміри, в залежності від принципу роботи, можна класифікувати на три основні типи:

### 1.6.1 Тріангуляційний далекомір

Далекоміри цього типу визначають відстань за допомогою принципів геометрії. Процес вимірювання полягає в вимірюванні кута між променем лазера та відбитим променем світла, який потрапляє на фотоприймач. З величини цього кута та відстані між лазером і фотоприймачем обчислюється поточна відстань до об'єкта.

Переваги тріангуляційних далекомірів:

- Простота: Це найпростіший тип далекомірів серед усіх.
- Точність на близьких відстанях: Мають високу точність вимірювань на невеликих дистанціях.
- Висока швидкість вимірювань: Здатні до швидких вимірювань - до 10 кГц.

Недоліки тріангуляційних далекомірів:

- Падаюча точність на великих відстанях: Точність вимірювань зменшується із збільшенням відстані.
- Потреба у тривалому включенні лазера: Лазер повинен бути активний тривалий час (фотоприймачі обмежені чутливістю), що вимагає обмеження потужності з міркувань безпеки.
- Зворотнопропорційність габаритів і точності: Зменшення розмірів далекоміра може привести до погрешення точності вимірювань.

Хоча тріангуляційні далекоміри мають свої переваги, їх використання обмежується певними недоліками, особливо на великих відстанях та при необхідності компактних розмірів.

### 1.6.2 Фазовий далекомір

Фазові далекоміри використовують модуляцію світла лазера високочастотним сигналом. Затримка у часі поширення променя до об'єкта і його повернення призводить до фазового зсуву між сигналом, що використовується для управління лазером, і прийнятим від об'єкта.

Переваги фазових далекомірів:

- Висока точність: Здатні до вимірювань відстані з точністю у декілька міліметрів та менше.
- Малогабаритність: Можливість створення компактних пристройів.

Недоліки фазових далекомірів:

- Постійна робота лазера: Необхідність постійної роботи лазера призводить до обмеження його потужності, що може вплинути на точність на великих відстанях.
- Складність електроніки: Електроніка таких далекомірів вимагає складної конфігурації.

- Обмеження швидкості вимірювань: Важкість досягнення великої швидкості вимірювань.

Даний тип далекомірів застосовується в промисловості, геодезії та інших областях. Наприклад, лазерні рулетки і 3D-сенсори часто використовують фазовий метод вимірювання відстані.

### 1.6.3 Імпульсний далекомір

Імпульсні далекоміри, також відомі як «часопролітні» або TOF (Time Of Flight), широко використовуються в лідарних дослідженнях атмосфери та інших сферах. Цей тип далекоміра використовує класичний метод вимірювання відстані, визначаючи тривалість часу розповсюдження світлового імпульсу лазера до об'єкта і назад.

Переваги імпульсних далекомірів:

- Велика потужність імпульсів: Використання лазера в імпульсному режимі дозволяє генерувати імпульси з великою потужністю (понад МВт), збільшуючи відношення сигнал/шум на приймальному пристрої лідару.
- Вимірювання великих відстаней: Здатність вимірювати дуже великі відстані, навіть до Місяця.
- Висока швидкість вимірювань: Можливість досягнення швидкості вимірювань до 100 кГц і більше.

Недоліки імпульсних далекомірів:

- Складність виміряти відстань з високою точністю, наприклад порядку 1м, тому що роздільна здатність за відстанню  $\Delta L$  однозначно пов'язана із тривалістю лазерного імпульсу  $t_i$ , а також зі швидкістю світла співвідношенням:

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

- Обмежена точність на невеликих відстанях: Складність вимірювання відстані з високою точністю на невеликих дистанціях.
- Складна електроніка: Вимагає складної електроніки для обробки сигналів.

Імпульсні далекоміри знаходять широке застосування в атмосферних дослідженнях, геодезії, дистанційному зондуванні Землі, промисловості, автономних автомобілях та інших галузях, де необхідне вимірювання великих відстаней з прийнятною точністю.

## 1.7 Відмінності побудови лідарів для моніторингу атмосфери

Базова концепція лідара досить проста: передавач випускає лазерні промені в різних напрямках і очікує на їх відбиття. Знаючи швидкість світла, час в дорозі туди і назад дозволяє точно визначити відстань. Однак деталі цього процесу ускладнюються швидко. Кожен виробник лідарів має прийняти рішення щодо напрямку лазера, вимірювання часу та світлової частоти.

Відмінності лідарів можна розглядати за наступними критеріями:

### 1. За технологією управління променем:

- Лідар кругового огляду: Система Velodyne (2007) використовує 64 лазери, розташовані вертикально, обертаючись на 360 градусів.Хоча це забезпечує повне покриття, воно також дороге та складне.
- Механічний скануючий лідар: Використовує додаткове скануюче дзеркало для направлення лазерного променя в різні напрямки. Простіше в реалізації, але вимагає додаткового обладнання.
- Активна фазована антенна решітка: Використовує випромінювачі, що змінюють напрямок лазерного променя. Складно в реалізації, але дозволяє швидко сканувати повітряний простір.
- Лідар на основі випромінювання: Підсвічує всю область одночасно, використовуючи ширококутний лазер. Є обмеження на великі відстані.

## 2. За способом вимірювання відстані:

- Вимірювання часу розповсюдження світла: Лідар відправляє короткий імпульс і вимірює час повернення сигналу.
- Лідар безперервного випромінювання з частотною модуляцією (БВЧМ): Використовує безперервний промінь і змінює його частоту для вимірювання відстані.
- Лідар безперервного випромінювання з амплітудною модуляцією (Ніамей): Відправляє складну схему сигналу для стійкості до інтерференції.

## 3. За довжиною хвилі лазера:

- Лідари з фіксованою довжиною хвилі: Використовують твердотільні або напівпровідникові лазери з фіксованими довжинами хвиль.
- Лідари зі змінною довжиною хвилі: Випромінювачі можуть переставати довжину хвилі. Вимагає складної технічної реалізації.

Ці відмінності враховують різні аспекти, такі як точність, швидкість сканування та дальність вимірювань, і вони визначають ефективність лідарів в конкретних умовах використання.

## 2 МЕТОДИ ЛІДАРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АТМОСФЕРИ ТА ЛІДАРНЕ РІВНЯННЯ

З погляду квантово-механічних концепцій щодо взаємодії електромагнітного випромінювання з речовою, фотон (квант) може брати участь у кількох процесах, таких як поглинання, спонтанне випромінювання та вимушене випромінювання. В останньому випадку важливо розуміти принципи функціонування лазерів. Проте, в контексті лідарних досліджень атмосфери, особливо важливими є процеси поглинання та спонтанного випромінювання. Таким чином, всі методи лідарних досліджень пов'язані з цими двома ефектами.

### 2.1 Методи лідарних досліджень атмосфери

#### 2.1.1 Метод диференційного поглинання (ДП)

Фотон, який повністю передає свою енергію атому або молекулі і сам при цьому зникає, описується квантово-механічною моделлю поглинання. Ефект полягає в тому, що при взаємодії випромінювання з речовою частина енергії поглинається атомом або молекулою, перетворюючись у іншу форму, наприклад, тепло. Кожна молекула має унікальний спектр поглинання, який може бути отриманий у формі спектра пропускання, спектра відбиття, спектра послаблення сигналу зворотного розсіювання чи спектра втрат в резонаторі. Ідентифікація цього спектра дозволяє визначити склад речовини.

Реалізація методу вимагає двохвильового випромінювача лідару: одна частина випромінювання настроюється на довжину хвилі спектру поглинання домішки, концентрація якої вивчається, тоді як інша частина трохи відстроюється. Випромінювач та приймач розташовані на відстані один від одного. Інформація про концентрацію домішки міститься у різниці послаблення

випромінювання на трасі для двох довжин хвиль. Основною перевагою методу є його відносна простота реалізації, хоча відзначається неможливістю вимірювання розподілу концентрації домішки уздовж траси.

### 2.1.2 Метод диференційного поглинання та розсіювання (ДПР)

Метод диференційного поглинання та розсіювання (ДПР) в основному використовується для моніторингу та вимірювання концентрацій газів чи домішок атмосфери, аналогічно до попереднього методу ДП. Він також вимагає використання двохвильового випромінювача з точною настройкою одного променя на довжину хвилі спектру досліджуваної домішки.

У цьому методі використовується розсіяне молекулами атмосфери випромінювання, що фактично є носієм інформації. Однією з переваг ДПР є відсутність потреби у точному розташуванні передавача та приймача один від одного, що робить його більш ефективним порівняно з попереднім методом.

Однак, незважаючи на це, метод ДПР дозволяє отримати просторовий розподіл концентрації домішок уздовж траси, що є його суттєвою перевагою. Треба відзначити, що метод ДПР має деяке ускладнення у використанні апаратури та алгоритмів обробки результатів вимірювань, а також зменшену чутливість виявлення домішок серед його недоліків.

### 2.1.3 Метод аерозольного розсіювання

Аерозольне розсіювання представляє собою типовий випадок класичного пружного розсіяння, що відбувається на довжині хвилі падаючого випромінювання. Це відбувається, коли розміри розсіяних часток або газових молекул суттєво перевищують довжину хвилі оптичного випромінювання. Результатом є те, що розсіяне світло концентрується переважно в напрямку "вперед", водночас маючи значно меншу інтенсивність в напрямку "назад".

С погляду квантово-механічних концепцій, процес пружного розсіювання представляє собою миттєве відбиття фотона світла атомом чи молекулою без процесу поглинання. Коефіцієнт розсіювання, який кількісно визначає будь-який процес розсіювання електромагнітної енергії, визначається за формулою:

$$\beta = \frac{\Delta I}{I \cdot \Delta l}, \quad (2.1)$$

де  $I$  — інтенсивність випромінювання;  $\Delta I$  — зміна інтенсивності на просторовому інтервалі  $\Delta l$ .

Перетин розсіювання, що визначає ефективну площину взаємодії електромагнітного випромінювання з частинкою повітря, обчислюється за формулою:

$$\sigma = \frac{\beta}{N}, \quad (2.2)$$

де  $N$  — концентрація частинок в одиниці об'єму.

Хоча цей вид розсіювання має великий перетин, що забезпечує високу чутливість при зондуванні аерозольних часток, таких як пил чи водяні краплі, аерозольне розсіювання не властиве для аналізу атомного і молекулярного складу атмосфери.

Важливо зауважити, що для реалізації цього методу перестроювання довжини хвилі випромінювання не потрібно, тому можливе використання будь-якого лазера з фіксованою довжиною хвилі та достатньою енергією в імпульсі.

#### 2.1.4 Метод Релеєвського розсіювання

Метод Релеєвського розсіювання представляє собою один із видів пружного розсіювання, що відбувається в результаті відбиття світла від молекул повітря. Analogічно до аерозольного розсіювання, розсіювання в цьому методі відбувається без зміни енергії молекул, які взаємодіють з фотоном світла.

Унікальність цього виду розсіювання полягає в тому, що його інтенсивність обернено пропорційна четвертій ступені довжини хвилі, тобто  $\beta_m \sim \lambda^{-4}$ . Це дозволяє ефективно виділити аерозольну та молекулярну складову атмосфери.

Метод Релеєвського розсіювання застосовується для дослідження турбулентності атмосфери, вивчення флюктуацій щільності в дифузійних пламенах та визначення видів молекул у турбулентному потоці. Цей метод відкриває можливості для більш глибокого аналізу структури атмосферних явищ та розрізnenня різних її компонентів.

### 2.1.5 Метод спонтанного комбінаційного розсіювання (СКР)

Перетин комбінаційного розсіювання є значно меншим за молекулярний, проте його визначення дозволяє отримувати інформацію про концентрацію молекул в атмосфері. При цьому вимірюючи інтервал довжин хвиль між спектральними лініями первинного та комбінаційно розсіяного випромінювання, можна точно ідентифікувати молекулярні компоненти атмосфери. Незважаючи на те, що перетин комбінаційного розсіювання значно менший, його використання є доцільнішим при зондуванні атмосфери за допомогою лазерів з меншими довжинами хвиль.

Реалізація методу СКР дещо складна. В першу чергу, необхідно значно зменшити спектральну складову первинного випромінювання, що викликана пружним аерозольним та молекулярним розсіюванням. Вдруге, потужність лазера повинна бути великою для досягнення достатнього рівня сигналу в приймальній системі, оскільки перетин комбінаційного розсіювання дуже малий. В третю, точне вимірювання спектральних складових сигналу супроводжується ускладненням спектрального аналізатора.

Незважаючи на складнощі, метод СКР має свої переваги, такі як універсальність для отримання інформації про будь-яку атмосферну речовину. Інтенсивність ліній СКР пропорційна концентрації молекул у зондуючому

обсязі, що дозволяє отримувати кількісну інформацію про об'єкт дослідження. Методи лазерного зондування з використанням СКР є перспективними, оскільки надають можливість проводити ідентифікацію і контроль атмосферних складових з одного пункту.

### 2.1.6 Метод резонансного спонтанного комбінаційного розсіювання (РСКР)

Резонансне спонтанне комбінаційне розсіювання (РСКР) є варіацією методу СКР, яке виявляється, коли частота збуджуючого первинного випромінювання наближена до однієї з частот електронного переходу молекули. Внаслідок цього спостерігається значне (на три-четири порядки) збільшення перетину комбінаційного розсіювання. У випадку використання джерел випромінювання в ультрафіолетовому діапазоні збільшується ймовірність виникнення РСКР.

Дослідження на молекулах N<sub>2</sub> показали збільшення перетину від трьох до шести порядків величини порівняно з перетином звичайного комбінаційного розсіювання при переході до резонансу для молекул, таких як I<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>. Це дає можливість виявляти дистанційно низькі концентрації атмосферних складових, якщо поглиблення не призводить до значного ослаблення зондувального випромінювання.

Перевагами методу є значне підвищення відношення сигнал/завада порівняно зі звичайним СКР. Проте, серед недоліків варто відзначити необхідність використання лазеру, здатного до перестроювання частоти, і те, що цей лазер має працювати в ультрафіолетовому діапазоні, що може обмежити практичне застосування цього методу.

### 2.1.7 Метод резонансного розсіювання

Якщо Резонансне розсіювання, відоме як атомна флуоресценція, виникає, коли частота енергетичного переходу в атомі співпадає з частотою фотона, що випромінюється лазером. Атоми поглиблюють випромінювання, переходят у збуджений стан, а потім швидко повертаються в первинний стан, випромінюючи фотон тієї самої довжини хвилі. Це феномен відомий як резонансне розсіювання і є ізотропним.

У порівнянні з молекулярним розсіюванням, перетин резонансного розсіювання значно більший (на кілька порядків). Наприклад, для атомів натрію ця різниця становить 14 порядків. Однак практичне використання цього методу у нижній атмосфері обмежене тим, що час життя збудженого атома є коротшим за середній час прольоту молекул до зіткнення. Це призводить до тушіння флуоресценції, де збуджені атоми не встигають перевипромінювати світло перед зіткненням з молекулою повітря.

Унікальною особливістю резонансного методу є його висока чутливість завдяки великому перетину розсіювання. Резонансний лідар дозволяє вимірювати концентрацію лужних металів метеорного походження навіть до одного атома у кубічному сантиметрі на висотах приблизно 100 км.

Щоб реалізувати цей метод, потрібно використовувати вузькосмуговий лазер із можливістю перестроювання довжини хвилі, а також складну систему контролю спектральних параметрів випромінювання. Резонансне розсіювання має великий потенціал для дослідження верхньої атмосфери і вирішення багатьох фізичних завдань, таких як дослідження фотохімічних реакцій, концентрації газів і іонізованих компонент атмосфери.

### 2.1.8 Молекулярна резонансна флуоресценція

Флуоресценція Флуоресценція – це явище, коли молекула випромінює фотон під час релаксації після переходу в збуджений стан. Поглиблена випромінювання переводить молекулу у будь-який можливий збуджений

електронний стан, а потім за рахунок взаємодії з оточуючим середовищем надлишок енергії швидко витрачається, переводячи молекулу на найнижчий коливальний рівень стану S<sub>1</sub>. Далі молекула може випромінювати фотон з цього коливального рівня, але випромінювання може також відбутися від інших коливальних рівнів основного стану. Такий процес коливальної релаксації призводить до широкосмугової флуоресценції для багатоатомних молекул [4].

Молекулярна резонансна флуоресценція виникає, коли частота падаючого світла збігається з однією з власних частот атома, і виникає резонанс, при якому атомні електрони розгойдуються сильніше. Як результат, інтенсивність розсіюваного світла значно збільшується (рис. 2.1) [9].. Це явище було вперше виявлено в 1905 році Робертом Вудом і стало відоме як резонансна флуоресценція.

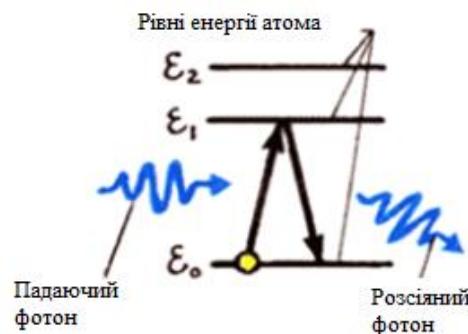


Рисунок 2.1 — Явище резонансної флуоресценції

Методи виявлення, засновані на молекулярній флуоресценції, мають високу чутливість, що дозволяє використовувати їх для дистанційного зондування. Проте, широкосмуговий характер молекулярної флуоресценції ускладнює ідентифікацію речовин, оскільки спектри випромінювання можуть перекриватися. Також тривалість флуоресценції впливає на просторовий дозвіл методу, і збільшення тривалості може привести до погіршення просторового розділення.

З квантової точки зору, для атомного резонансу необхідно, щоб енергія падаючого фотона збігалася з енергією одного з рівнів атома. У разі молекул і

атомів повітря, які знаходяться в хаотичному тепловому русі, а також аерозолів, що переносяться вітром, спостерігається ефект Доплера.

Ефект Доплера виникає внаслідок руху джерела світла або розсіювача. У випадку акустики це проявляється у зміні частоти звукових коливань при наближенні або віддаленні джерела звуку від спостерігача. Аналогічно, ефект Доплера характерний і для електромагнітних хвиль, таких як світло.

Коли фотонипадають на молекули і розсіюються, вони можуть зазнати зміни частоти через Доплерівське розширення ліній випромінювання. Це відбувається через хаотичний рух молекул з різними швидкостями та в усіх напрямках, що призводить до розширення ліній випромінювання.

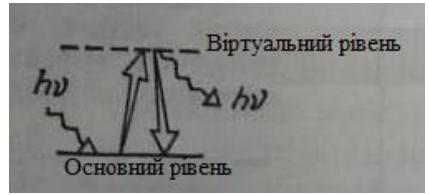
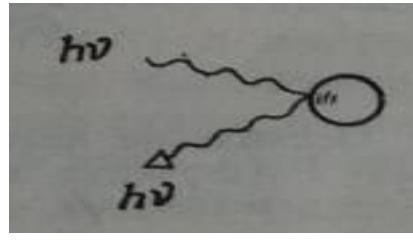
Це явище доплерівського розширення ліній випромінювання вже використовувалося для визначення температури верхніх шарів атмосфери за лініями випромінювання полярних сяйв. Також, астрофізиками воно використовується для визначення швидкостей галактик, що розлітаються.

Ефективність процесу поглинання визначається поперечним перетином поглинання однією молекулою, а добуток цієї величини на кількість молекул в одиниці об'єму є показником поглинання даного середовища. Аналогічно, ефективність розсіювання визначається величиною показника розсіювання. Сума показників поглинання і розсіяння є показником ослаблення середовищем даного випромінювання, і це ослаблення відбувається за законом Бугера.

### 2.1.9 Порівняльний аналіз лідарних методів дослідження атмосфери

В таблиці 2 наведені основні способи розсіювання світла атмосферними складовими [1].

Таблиця 2 — Процеси взаємодії випромінювання з речовиною в атмосфері, використовувані в лазерному дистанційному зондуванні

Метод	Фізичний опис	Ілюстрація
Релеєвське розсіювання	Лазерне випромінювання, пружно розсіюване атомами та молекулами, спостерігається на початковій частоті	
Розсіювання Mi	Лазерне випромінювання, пружно розсіюване малими частинами, розмір яких порівнянний із довжиною хвилі, спостерігається на початковій частоті на початковій частоті	
Комбінаційне розсіювання	Лазерне випромінювання, розсіюване молекулами, спостерігається з деяким частотним зсувом, характеризуючим дані молекули ( $h\nu - h\nu^* = E$ )	
Резонансне розсіювання	Лазерне випромінювання на частоті певного атомного переходу розсіюється на початковій частоті	
Флуоресценція	Лазерне випромінювання на частоті певного електронного переходу в атомі або молекулі, поглинуте та випромінюване на більш низькій частоті; може виникнути гасіння	
Поглинання	Ослаблення лазерного пучка, якщо його частота потрапляє в полосу поглинання даної молекули	

<b>Диференційне поглинання розвіювання</b>  <b>i</b>	<p>Диференційне ослаблення двох лазерних пучків, визначене їхніми сигналами зворотного розсіювання; частота одного пучка налаштовується близько до частоти молекулярного переходу, в той час як частота іншого зміщена від частоти переходу</p>	
--------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

На рисунку 2.2 [1] наведено діапазони перетину розсіювання для різних процесів в атмосфері. Як видно, перетини аерозольного розсіювання ( $M_i$ ) можуть бути надзвичайно великими, дозволяючи реєструвати сигнали розсіяного випромінювання від навіть невеликої кількості розсіюючих частинок. Це явище дозволяє застосовувати лазерне дистанційне зондування для вимірювання дуже малих концентрацій пилу та аерозолю в атмосфері.

Резонансне розсіювання, хоча іноді називається атомною або резонансною флуоресценцією, також відзначається великим перетином. Однак гасіння при зіткненнях з більш поширеними складовими атмосфери зазвичай зводить до слабкого сигналу, що обумовлено резонансним розсіюванням. Це заслуговує на увагу при використанні цього методу для дослідження верхньої атмосфери.

У випадку молекулярної флуоресценції, гасіння за рахунок зіткнень молекул може негативно впливати на сигнал, навіть у випадку тривалих станів збудження. Широкосмуговий характер молекулярної флуоресценції призводить до низького відношення сигнал/шум, де основним джерелом шуму є фонове випромінювання. Збільшення тривалості флуоресценції може призводити до погіршення просторового дозволу. Ці особливості слід враховувати при використанні цих методів для вимірювань в атмосфері.

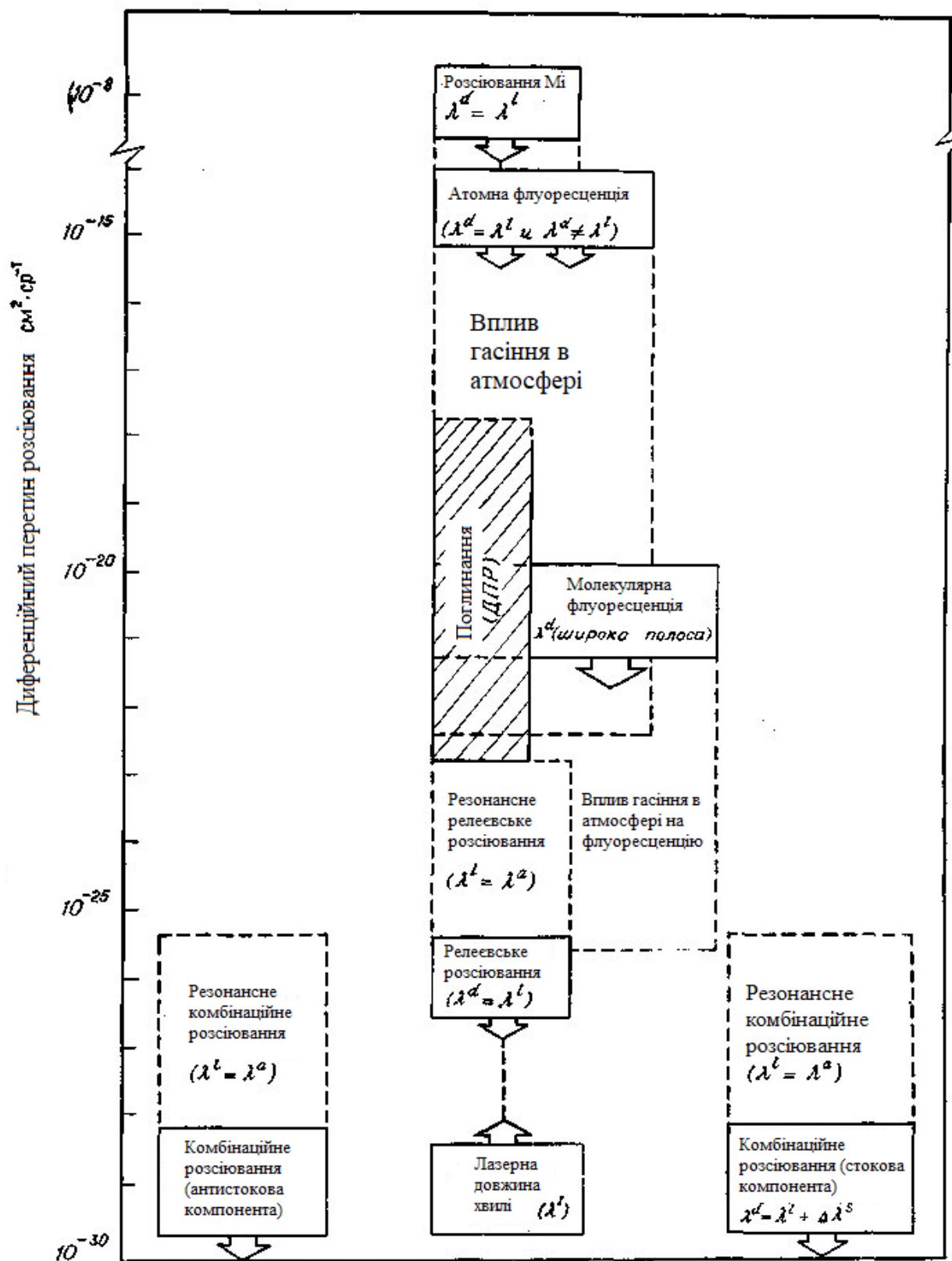


Рисунок 2.2 — Типи оптичної взаємодії, які використовуються в лазерному зондуванні

## 2.2 Лідарне рівняння

Лідарне рівняння в наближенні однократного розсіювання описує взаємодію лазерного променя з атмосферними частками та молекулами. Основними параметрами у цьому рівнянні є інтенсивність випромінювання, яка змінюється при проходженні через атмосферу, та розсіювання, що визначається властивостями атмосферних часток.

Математично лідарне рівняння може бути записане наступним чином [1]:

$$P_r(R) = P_0 \Delta R \beta_\pi(R) A_r R^{-2} \exp \left[ -2 \int_0^R a(r) dr \right] \quad (2.3)$$

де  $P_r(R)$  — миттєве значення приймальної потужності з відстані  $R$ ;

$P_0$  — потужність лазерного імпульса;

$\Delta R = (c \cdot \tau)/2$  — просторовий дозвіл;

$c$  — швидкість світла;

$\tau$  — тривалість лазерного імпульса;

$\beta_\pi$  — об'ємний коефіцієнт розсіювання назад;

$R$  — відстань;

$A_r$  — ефективна площа приймальної апертури;

$a$  — об'ємний коефіцієнт ослаблення.

Імпульс, випущений в атмосферу, має обмежену тривалість  $\tau$ . Кожного моменту часу він освітлює об'єм атмосфери з кінцевою довжиною ст. Зважаючи на те, що імпульс подоляє подвійний шлях, відстань, з якої в момент  $t$  приймається сигнал, становить лише половину цієї довжини.

Для кількісного уявлення процесу припустимо, що передній край імпульсу випущений в момент часу  $t_0$ . Тоді максимальна відстань, з якої може бути отримано випромінювання в момент  $t$ , визначається половиною відстані, яку передній край імпульсу пройшов би за цей період часу.

Отже, максимальна відстань  $R$ , на якій можна отримати сигнал в момент часу обчислюється за формулою:

$$R = \frac{c(t-t_0)}{2} \quad (2.4)$$

В той же самий момент  $t$ , при настанні якого надходить енергія від тих частин імпульсу, які були випущені після його початку, мінімальна відстань  $R'$ , на якій можливий сигнал, визначається виразом:

$$R' = c(t - t_0 - \tau)/2 \quad (2.5)$$

Отже, ефективна довжина імпульсу  $\tau$ , відома як інтервал дальності, визначає відстань, обумовлену цією характеристикою. Вона визначається виразом:

$$\Delta L_p = R - R' = \frac{c\tau}{2} \quad (2.6)$$

Це значення точно відповідає половині дійсної довжини об'єму, який освітлюється миттєвим імпульсом, через подвійний шлях, який випромінювання повинно подолати.

Об'ємний коефіцієнт розсіювання назад  $\beta$  визначається як частка падаючої енергії, розсіяної в одиничному тілесному куті (стерадіан) у напрямленні назад на одиничну довжину атмосфери. У зв'язку з пружним розсіянням, де падаюче і прийняте випромінювання мають однакову довжину хвилі, символ  $\beta$  буде використовуватися для позначення компоненту об'ємного коефіцієнта пружного розсіювання в напрямку назад.

Ефективна площа приймача враховується в рівнянні, оскільки вона визначає тілесний кут, під яким приймач видно з відстані  $R$ , за умови, що кут

розділення посилається не перевищує кут прийому, і всю випущену енергію вносить вклад у розсіювання назад на відстані  $R$ .

Величина представляє пропускання  $T$  випромінювання на подвійному шляху між лідаром і відстанню  $R$ :

$$\exp \left[ -2 \int_0^R a(r) dr \right] \quad (2.7)$$

Ця величина залежить від  $a$  — об'ємного коефіцієнта ослаблення атмосфери, що показує, в скільки разів зменшується потік випромінювання на одиничному шляху в напрямку поширення.

Використання цього коефіцієнта у простій формі передбачає виконання закону Бугера, коли практично весь розсіяний енергії постійно віддаляється від лазерного пучка. Такий підхід зазвичай ефективний для дуже прозорої атмосфери.

Але в атмосфері з високим рівнем розсіювання, як от в хмарах, тумані чи щільній серпанку, частка розсіяного випромінювання, яка повертається в пучок або залишається в ньому, може бути значною. У таких умовах слід враховувати багаторазове розсіювання у рівнянні для одноразового розсіювання.

Розміри газових молекул в атмосфері значно менші порівняно з довжинами хвиль лазерного випромінювання. Тому пружне розсіяння в напрямку назад на молекулах атмосферних газів (за винятком ліній поглинання) може бути описане наближенням релеєвського розсіювання:

$$\beta_g = \beta_R = \frac{N_g d\sigma_r(\pi)}{d\Omega} \quad (2.8)$$

де  $N_g$  — число молекул газу в одиниці об'єму;

$d\sigma_r(\pi)/d\Omega$  — диференційний перетин релеєвської відстані під кутом  $\pi$  в розрахунок на одну середню молекулу газу.

Для суміші атмосферних газів на висотах до 100 км використовується формула:

$$\frac{d\sigma_r(\pi)}{d\Omega} = 5.45 \left[ \frac{\lambda(\text{мкм})}{0.55} \right]^{-4} \cdot \frac{10^{-28} \text{см}^2}{\text{ср}}$$

Потужність лідарного сигналу від резонансного розсіювання на висоті  $z$  може бути описано подальшим рівнянням:

$$P(z) = \frac{P_0 A \eta T(z)^2 p_{Na}(z) \sigma_{eff}}{z^2} \quad (2.9)$$

де:  $P(z)$  інтенсивність прийнятого сигналу;

$P_0 = Ec/2$  – вихідна потужність, де

$E$  — енергія імпульсу;

$c$  — швидкість світла;

$A$  — площа приймальної апаратури;

$\eta$  — квантова ефективність фотоприймача;

$T(z)$  — пропускання атмосфери;

$p_{Na}$  — щільність атомів натрію на висоті  $z$ ;

$\sigma_{eff}$  — ефективний перетин поглинання.

Сигнал зворотного розсіювання переважно виникає внаслідок присутності домішкових атомів. Розсіювання від аерозолів або молекул на подібних висотах можна ігнорувати, оскільки воно надто мале. Таким чином, увага зосереджується лише на сигналі резонансної флуоресценції.

## 2.3 Лідарна апаратура і методика резонансного зондування домішок

Лазерне зондування атмосфери – це метод, який використовує лазерне випромінювання для вивчення складу та властивостей атмосферних шарів. Принцип дії лідара схожий на принцип радіолокації, але використовує електромагнітне випромінювання у видимому діапазоні. Лазерне випромінювання частково поглинається та розсіюється атмосферними компонентами, а прийнятий сигнал реєструється для отримання інформації про властивості атмосфери. Основні механізми розсіювання включають молекулярне, аерозольне та резонансне розсіювання.

Ефект молекулярного розсіювання або релєєвського розсіювання (ефективний переріз розсіяння назад  $\sigma_m^\pi \sim 10^{-28} \text{ см}^2 \sim \lambda^{-4}$ ) визначається ефективним перерізом розсіювання назад і є основою для роботи релєєвського лідара. Цей метод дозволяє отримувати вертикальний профіль щільності та температури атмосфери [5].

Метод аерозольного або Мі-розсіювання використовується для отримання інформації про профіль атмосферного аерозолю на висотах від 10 до 30 км. Резонансне розсіювання також є ефективним для деяких компонентів атмосфери. Широке застосування метод резонансного розсіювання знайшов для реєстрації висотних профілів лужних металів, таких як натрій (Na), калій (K), літій (Li), що природно присутні на висотах від 80 до 100 км. Особливо важливою є техніка лідарних спостережень мезосферного натрію. На рис. 2.3 [6]. наведено структурну схему типової резонансної лідарної системи.

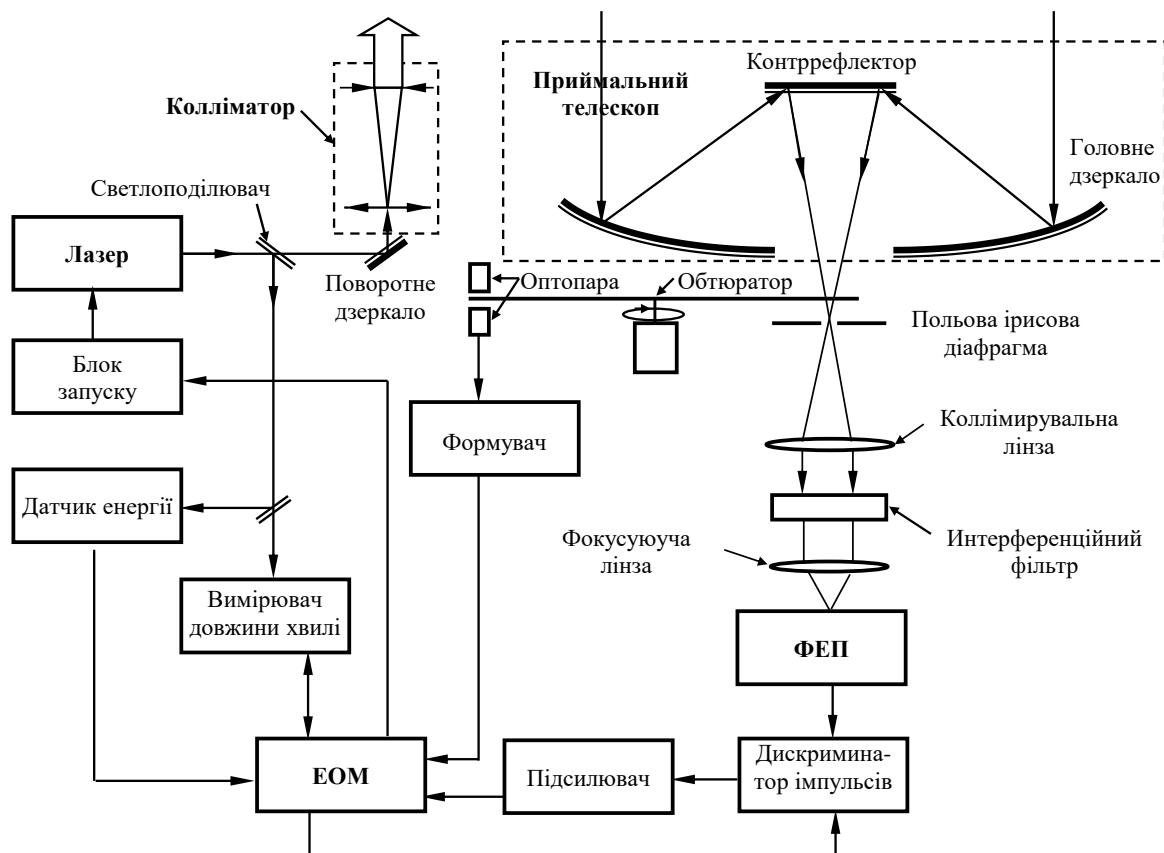


Рисунок 2.3 — Структурна схема типової резонансної лідарної системи

Під час зондування атмосфери лазер відправляє імпульс, налаштований на резонансну лінію поглинання атома. Лазери на барвниках, які накачуються лампою-спалахом, часто використовуються для цього. Частина випромінювання направляється на датчики спектрального контролю та енергії, а також на імпульсний фотодетектор, який синхронізує роботу передавача та приймального пристрою.

Імпульс лазерного випромінювання досягає шару мезосфери, збуджуючи атоми в збуджений стан. Час життя атома в збудженному стані значно коротший, ніж середньостатистичний інтервал між зіткненнями на цих висотах, тому можна ігнорувати гасіння флуоресценції. Практично всі збуджені атоми випромінюють, переходячи в основний стан.

Розсіяне назад випромінювання збирається телескопом і фокусується на фотоелектронному помножувачі (ФЕП). Оскільки рівень сигналу ФЕП зазвичай дуже низький, ФЕП працює в режимі рахунку фотонів.

Для придушення фонової засвітки фотоприймача, викликаної випромінюванням, розсіяним з низьких висот, використовується механічний затвор-обтюратор, який синхронізує включення лазера під час перекриття ФЕП. Польова діафрагма обмежує кут зору телескопа, а інтерференційний фільтр пригнічує фонове випромінювання за межами спектра випромінювання лазера.

Сигнал ФЕП обробляється імпульсним підсилювачем-дискримінатором та лічильником, стробувальним по дальності. Лідарні дані складаються з серій імпульсів, що відповідають послідовним інтервалам дозволу по дальності. Оскільки рівень сигналу від одного лазерного імпульсу зазвичай недостатній для відновлення профілю концентрації домішки, фотони накопичуються за кількома імпульсами протягом часу, що визначається енергетичними характеристиками лідара [7].

Передавач є важливою та складною частиною резонансного лідара, що визначається жорсткими та, часто, суперечливими вимогами. В резонансних лідарах використовуються як лазери з когерентним накачуванням, так і лазери на барвниках з ламповим накачуванням, при цьому останні, при порівнянні значень середньої потужності, мають перевагу в енергії випромінювання в імпульсі.

Оптичні схеми лампових генераторів зазвичай використовують плоскопаралельний резонатор. Це забезпечує заповнення модами резонатора всього обсягу активного середовища, що є важливим для досягнення максимальної енергетичної ефективності. Крім того, плоскопаралельний резонатор спрощує взаємне юстування вісі приймача і передавача.

Спектральний контроль випромінювання має важливе значення, оскільки в резонансному зондуванні спектральні характеристики випромінювання напряму впливають на точність вимірювань. Випромінювання генератора пропускається через резонансний осередок. При збігу довжини хвилі випромінювання з контуром поглинання речовини спостерігається інтенсивне перевипромінювання, яке реєструється фотоприймачем. Інформація про налаштування в цьому випадку міститься в амплітуді імпульсів на виході

фотоприймача. Резонансний спосіб контролю є простим у реалізації та має виняткову достовірність. Однак він має важливий недолік - відсутність інформації про знак розстроювання, що обмежує його використання в системах автопідстроювання.

Процес виявлення розсіяного випромінювання описується статистикою Пуассона, а похибка вимірювання може бути визначена за формулою:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (2.10)$$

де  $N$  — кількість зареєстрованих фотонів.

При вимірюванні лідарного сигналу ця похибка повинна бути не більше 0,5%. Таким чином, з одного висотного шару система повинна реєструвати не менше  $4 \cdot 10^4$  фотонів. Проте реальні сигнали набагато слабші, тому використовується метод накопичення сигналу протягом певної кількості зондувань, і формула має вигляд:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{N_1 \cdot m}},$$

де  $N_1$  — середньо статистична кількість зареєстрованих фотонів від одного акту зондування;  $m$  — кількість зондувань.

Висновки щодо даного розділу можна узагальнити наступним чином:

- З-поміж різноманітних методів і систем для зондування та контролю атмосферного середовища найбільш чутливим є метод резонансного розсіювання. Важливо відзначити, що практична реалізація цього методу можлива лише для висот верхньої атмосфери.
- Використання методу резонансного розсіювання передбачає наявність у лідарі вузькосмугового лазера, здатного переструмувати довжину хвилі випромінювання.

- Резонансний лідар повинен включати систему точного налаштування довжини хвилі випромінювання на спектр поглинання речовини, що досліджується.

### 3 Аналіз факторів, що впливають на точність виміру атмосферних домішок

#### 3.1 Характеристика і природа домішкових шарів у верхній атмосфері

Більше 30 років лазерні локаційні системи, відомі як лідари, застосовуються для дослідження фотохімічних і динамічних процесів в верхній мезосфері – нижній термосфері. Вони використовують ефект резонансної флуоресценції на атомах металів та їх іонах, таких як натрій, літій, калій, кальцій, залізо, і іони кальцію, магнію, барію та інші. Головним джерелом утворення металовмісних шарів в цій області атмосфери є ablляція метеорної речовини. Метеорні потоки, вступаючи в атмосферу Землі, створюють значну кількість металевих трасерів, що слідкування за ними дозволяє отримати інформацію не лише про склад метеорної матерії, а й про параметри верхньої атмосфери.

Порядок величин поперечних перетинів резонансного розсіювання свідчить про потенційні можливості методу. Зокрема, використання резонансного розсіювання лазерного випромінювання на атомах і іонах металів є перспективним при спостереженнях за метеорною матерією, що входить в атмосферу Землі. Атоми і іони металів генерують основні лінії, виявлені у спектрах свічення метеорів на висотах 80-130 км. Спектри метеорних потоків, які мають велику геоцентричну швидкість, відрізняються сильними лініями іонів, на відміну від потоків з низькою геоцентричною швидкістю.

Багато досліджень присвячено резонансній флуоресценції натрію, оскільки він має велику кількість в атмосфері, великий поперечний перетин розсіювання та наявність ефективних лазерних джерел випромінювання на відповідній резонансній довжині хвилі атома. Натрієвий шар, так само як і інші металомісткі шари, розташований на висотах від 80 до 110 км з невеликими варіаціями кордонів. Він був відкритий задовго до появи резонансних лідарів і спостерігався

у резонансному розсіюванні сонячної радіації, дозволяючи визначати, головним чином, сезонні варіації загального вмісту атомів в цьому шарі.

Границі натрієвого шару були вперше визначені на основі ракетних вимірювань денного світіння натрію. З'явлення перестроюваних лазерів дозволило дистанційно досліджувати вертикальну структуру натрієвого шару за допомогою лідарів і резонансної флуоресценції натрію. Висотний діапазон вимірювань температури та щільності за допомогою молекулярного розсіювання має свої обмеження: аерозольне розсіювання знизу порушує пропорційність реєстрованого сигналу і щільності повітря, а точність вимірювань самого сигналу зверху залежить від щільності атмосфери та квадрату дальності зондування (висоти).

Останнім часом великий інтерес в дослідженнях викликає використання резонансного лідара в адаптивних оптических системах. Астрономічні телескопи стикаються з обмеженнями роздільної здатності через атмосферну турбулентність. Корекція хвильового фронту здійснюється за допомогою деформованих або сегментованих дзеркал, керованих електроприводами, для компенсації спотворень від проходження випромінювання через атмосферу. Для ефективної роботи таких систем необхідні яскраві джерела випромінювання біля об'єкта спостереження. Використання лазера з перестроюванням довжини хвилі може створити природну коригуючу зірку в натріевому шарі для адаптивного телескопа, що виходить на дифракційну межу. Для досягнення необхідних рівнів сигналів на вході аналізуючих пристрій хвильового фронту потрібні більш високі енергетичні характеристики передавача.

### 3.2 Особливості конструкції резонансного лідара

Моностатична конфігурація резонансного лідара є найбільш пошиrenoю. У цій конфігурації лазерний промінь передається або вздовж оптичної осі приймального телескопа, або паралельно їй. Для досягнення просторової

роздільної здатності використовують імпульсний лазерний випромінювач та стробування приймача по дальності. Схема моностатичної лідарної системи на резонансній флуоресценції схожа на схеми лідарів на аерозольному, релеєвському або раманівському розсіюванні. На рис. 3.1 [11] можна побачити структурну схему типового лідара на резонансній флуоресценції. Імпульсний лазер налаштовується на резонансну лінію поглинання NaD2 при довжині хвилі 589 нм, яка знаходиться в жовто-помаранчевій частині видимого спектру. Більшість існуючих лідарів на резонансній флуоресценції використовують лазери на барвниковому накачуванні лампою-спалахом, а також ексимерні лазери чи Nd-лазери зі спробудженим випромінюванням активованим газом.

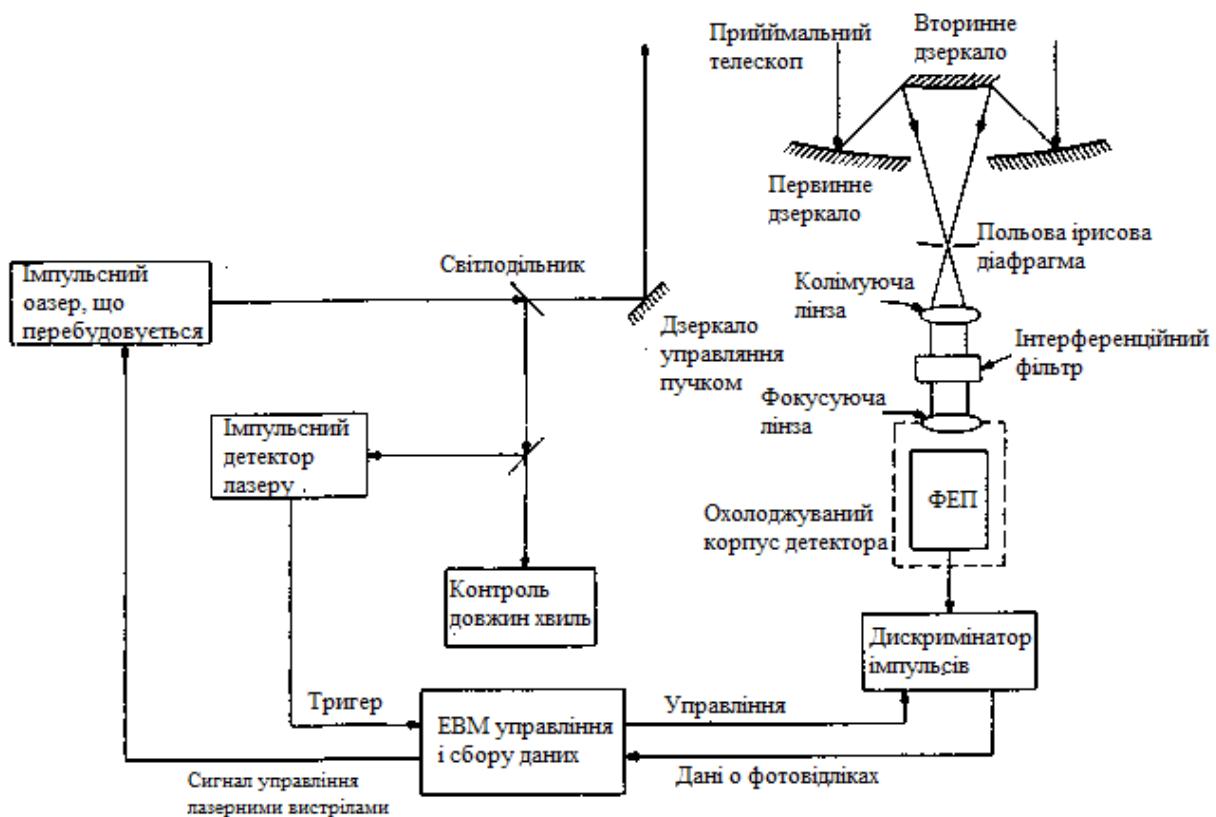


Рисунок 3.1 – Структурна схема типового РФН-лідара

Маленька частина (<1%) випромінювання лазера спрямовується на датчики для контролю довжини хвилі і енергії, а також на імпульсний детектор, який синхронізується з системою прийому даних. Імпульс лазерного випромінювання досягає натрієвого шару, де відбувається резонансне розсіювання на нейтральних атомах Na. Розсіяні фотони повертаються назад і

збираються телескопом, фокусуючись на фотоелектронному помножувачу (ФЕП). Завдяки дуже слабкому розсіяному сигналу ФЕП працює в режимі рахунку фотонів, навіть при роботі лідарної системи в денний час. Польова (фокальна) ірисова діафрагма і інтерференційний фільтр у приймальному телескопі пригнічують значну частину фонового світла від зірок, Місяця і Сонця. Сигнал ФЕП піддається обробці імпульсним дискримінатором та лічильником, який стробується по дальності. Імпульсний дискримінатор перетворює слабкі (кілька десятих часток вольта) імпульси ФЕП в логічні сигнали, які потім можна обробляти за допомогою стандартних швидкодіючих цифрових схем. Первинні дані лідару представляють собою серії вимірювань фотонів, відповідних послідовним елементам дозволу по дальності. Оскільки сигнал від одного лазерного імпульсу недостатній для відтворення повного профілю концентрації Na, фотони накопичуються протягом декількох імпульсів протягом періоду від десятків секунд до декількох хвилин, залежно від необхідної точності вимірювань.

### 3.3 Аналіз рівняння оптичної локації стосовно резонансного лідару

Рівняння оптичної локації визначає характеристики будь-якої лідарної системи, зокрема для системи на резонансній флуоресценції лазерного рівняння. У випадку резонансної флуоресценції лідарної системи рівняння лазерної локації виражається так [1]:

$$N(z) = (\eta \cdot T_A^2) \cdot \left(\frac{E_0}{hv}\right) \cdot \sigma_{e\phi}(\nu) \cdot n_s(z) \cdot \Delta z \cdot \left(\frac{S_{np}}{4\pi z^2}\right) + N_w \quad (3.1)$$

де  $N(z)$  — очікуване число фотонів, що прийшли із зондуочого обсягу з інтервалом дальності від  $z - \Delta z/2$  до  $z + \Delta z/2$ ;

$n_s(z)$  — абсолютна концентрація атомів домішки на дальності  $z$ ;

$N_w$  — очікуване число фонових або темнових фотовідліків на інтервалі дозволу по дальності за один імпульс;

$\sigma_{e\phi}(\nu)$  — залежний від частоти ефективний перетин розсіяння на атомах домішки;

$\Delta z$  — довжина інтервалу дозволу по дальності;

$S_{pr}$  — площа апертури приймального телескопа;

$\nu$  — частота випромінювання;

$h$  — постійна Планка;

$c$  — швидкість світла;

$E_0$  — енергія випромінювання передавача;

$T_A$  — однопроходовий коефіцієнт пропускання атмосфери;

$\eta$  — оптичний ККД лідара, що дорівнює добутку коефіцієнтів пропускання приймальної і передавальної оптики.

Вираз (3.1) отримано за умови, що ослаблення лазерного променя, яке відбувається при проходженні через зондуючий шар, є надзвичайно слабким (оптично тонким шаром), і щільність енергії в пучку в цьому шарі досить мала для того, щоб можна було ігнорувати ефекти індукованого випромінювання збудженими атомами.

Коефіцієнт включає в себе оптичні ефективності світлодільників, лінз, дзеркал і оптичних фільтрів в передавачі і приймальному телескопі, а також квантовий вихід фотоелектронного помножувача (ФЕП). Другий множник у виразі (3.1) представляє собою кількість фотонів, які випромінюються лазерним передавачем. Третій множник — перетин розсіювання — визначає ймовірність того, що фотон буде розсіяний атомом домішки.

Перетин розсіювання залежить від довжини хвилі і ширини лінії випромінювання, а також від швидкості і температури розсіюваних атомів. Узагальнено, ефективне значення перетину розсіювання визначається виразом:

$$\sigma_{e\phi} = \frac{\int_{\nu} \sigma(\nu) \cdot E(\nu) d\nu}{\int_{\nu} E(\nu) d\nu} \quad (3.2)$$

де  $\sigma(\nu)$  — частотний профіль перетину резонансного розсіювання;  
 $E(\nu)$  — контур спектра випромінювання лазера.

Для доплеровської ушириної резонансної лінії із гаусовою формою спектра при збігу центрів ліній випромінювання і поглинання ефективний переріз розсіяння можна записати у вигляді:

$$\sigma_{e\phi} = \sigma \frac{\delta\nu_D}{\sqrt{(\delta\nu_D)^2 + (\delta\nu_L)^2}}_{max} \quad (3.3)$$

де  $\sigma_{max}$  — перетин поглинання (розсіяння) в максимумі лінії;  
 $\delta\nu_D$  — ширина лінії, обумовлена доплеровським розширенням;  
 $\delta\nu_L$  — ширина спектра випромінювання.

З останнього виразу випливає, що для збільшення інтенсивності зворотньорозсіюваного випромінювання необхідно зменшувати смугу генерації лазерного передавача. У загальному випадку резонансна лінія атома являє собою набір близько розташованих доплеровських розширених ліній. У цьому випадку звуження смуги генерації має сенс лише до деяких меж.

Зазначено, що для підвищення інтенсивності зворотньорозсіюваного випромінювання необхідно зменшувати смугу генерації лазерного передавача. Однак важливо враховувати, що загальна резонансна лінія атома складається з близько розташованих доплерівських розширених ліній, і звуження смуги генерації має сенс лише до певних меж.

З рівняння локації (3.1) і виразу (3.3) можна зrozуміти, що інтенсивність приймального сигналу залежить як від енергії передавача, так і від ширини спектра випромінювання. Для зменшення ширини частот та перестроювання оптичних генераторів в резонаторі використовують селективні елементи, але це може призводити до додаткових втрат в резонаторі. Таким чином, прагнення

зменшити ширину спектральної лінії випромінювання може привести до зниження енергії випромінювання.

У виразі (3.4) визначено критерій ефективності енергії випромінювання, який враховує спектрально-енергетичні характеристики передавача співвідношенням:

$$E_{e\phi} = E_0 \cdot \sigma_{e\phi} / \sigma_{max} \quad (3.4)$$

Це є ключовим критерієм для оцінки ефективності роботи лідару, оскільки визначає рівень сигналу, і завдання полягає в досягненні його максимального значення.

### 3.4 Аналіз спектра поглинання атома і вплив ширини спектра випромінювання на ефективний перетин розсіювання

У спрощеній формулі (3.3) враховувалося, що спектр поглинання атома може бути представлений однією лінією з доплеровським розширенням. Однак у загальному випадку спектр може складатися з кількох окремих ліній, розташованих в певному відношенні по частоті. Наприклад, лінія поглинання натрію в жовтій області спектра розщеплена на дві компоненти (дублет натрію) - D1 та D2.

Цей дублет виникає внаслідок взаємодії спіну та орбітального руху електронів у атомі, що спричиняє розщеплення лінії поглинання на дві частини. Цікавіше вважати більш інтенсивну компоненту D2, яка включає надтонку структуру з декількох ліній, обумовлену внутрішньоядерним моментом кількості руху атомного ядра та пов'язаним з ним магнітним моментом.

Енергетична діаграма рівнів D2 лінії, зображена на рис. 3.2, підтверджує, що розщеплення S-термів значно перевищує розщеплення P-рівнів, дозволяючи знехтувати P-розщепленням для практичних обчислень. Таким чином, лінію

можна розглядати як дві компоненти, розділені частотним розщепленням S-терма, приблизно 1772 МГц. Важливо враховувати, що співвідношення інтенсивностей компонентів лінії дорівнює 5/3, і більш довга хвильова лінія має велику вагу в сумарній інтенсивності.

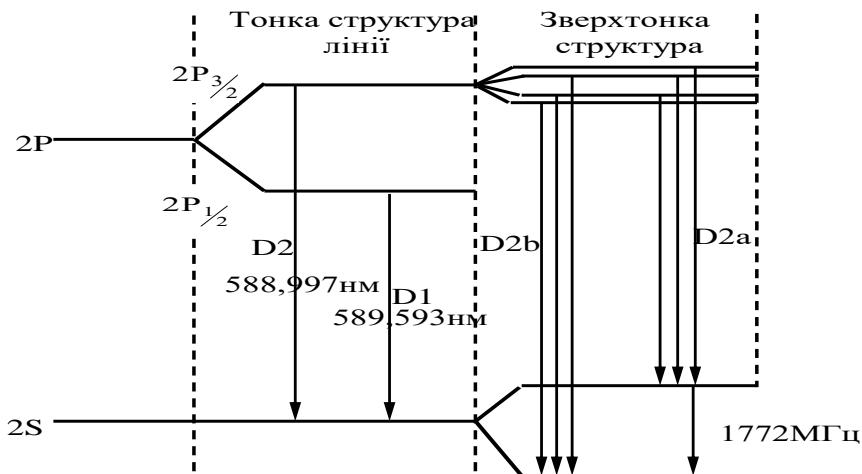


Рисунок 3.2 — Структура рівненого атому натрія

Для отримання контуру спектра поглинання розглянемо механізми розширення ліній. Життєвий час збудженого атома натрію, відомий як радіаційний час, становить  $\tau = 1,6 \cdot 10^{-8}$  сек, то природна ширина лінії  $\Delta\nu_n = 1/\tau \approx 50$  мГц. На висоті 100 км температура дорівнює приблизно 200° К. За умови максвелівського розподілу швидкостей доплерівська ширина лінії, зумовлена температурою атомів, обчислюється [10]:

$$\Delta\nu_D = 2 \cdot \frac{\nu_0}{c} \cdot \sqrt{\frac{2RT \ln 2}{m}} \quad (3.5)$$

де  $R$  — універсальна газова постійна;

$c$  — швидкість світла;

$\nu_0$  — частота переходу;

$T$  — температура;

$m$  — молекулярна маса.

Для натрію отримуємо, що  $\Delta\nu_D \approx 1$  ГГц, що означає, що доплерівське розширення кожної надтонкої складової близько в двадцять разів перевищує природну ширину. Таким чином, ефект Доплера повністю визначає розширення ліній.

Коефіцієнт поглинання дляожної надтонкої складової може бути виражений як:

$$k(\nu) = k_0 \cdot \exp \left\{ - \left[ 2\sqrt{\ln 2} \cdot (\nu - \nu_0) / \Delta\nu_D \right]^2 \right\} \quad (3.6)$$

де  $k_0$  — поглинання в максимумі лінії.

Перетин розсіювання переходу можна визначити за допомогою формули Кравця [12]:

$$f = \frac{3cm_e}{\pi \times e^2} \cdot \int_{\nu} \sigma(\nu) d\nu \quad (3.7)$$

де  $m_e$  — електронна маса;

$e$  — елементарний заряд.

Для випадку доплеровського розширення лінії, враховуючи (3.7), вираз (3.6) можна перетворити до вигляду:

$$\sigma \frac{2e^2}{3\Delta\nu_D m_e c} \sqrt{\pi \cdot \ln 2}_{max} \quad (3.8)$$

Спектр поглинання лінії натрію для доплерівського розширення можна отримати підсумовуючи доплерівсько розширені компоненти надтонкої структури за допомогою виразу:

$$\sigma(\nu) = \sigma_{max} \left\{ \begin{array}{l} (a) \exp \left\{ - \left[ \frac{2\sqrt{\ln 2}(\nu - \nu_0)}{\Delta\nu_D} \right]^2 + \sigma_{max} \right\} \\ (b) \exp \left\{ - \left[ \frac{2\sqrt{\ln 2}(\nu - \nu_0 - \delta\nu)}{\Delta\nu_D} \right]^2 \right\} \end{array} \right\} \quad (3.9)$$

де  $\sigma_{max}^{(a)(b)}$  – перетину поглинання в максимумі компонент;

$\nu_0$  – частота переходу  $a$ -компоненти;

$\delta\nu$ -частотний інтервал між лініями надтонкої структури.

На рис. 3.3 наведено резонансну лінію натрію із доплерівським розширенням, яку отримано шляхом обчислень за формулою (26) в залежності від частоти для різних значень температури при опроміненні монохроматичною радіацією. Схожі спектральні профілі поглинання можна отримати для інших атомів. Важливо відзначити, що відношення перетину розсіювання в максимумі лінії до його значення в мінімумі між піками дуже чутливе до температури. Здійснюючи вимірювання відношення інтенсивностей зворотньорозсіюваного сигналу при послідовному настроюванні вузькосмугового лазера на максимум і мінімум лінії, можна визначити вертикальний профіль температури в натрієвому шарі.

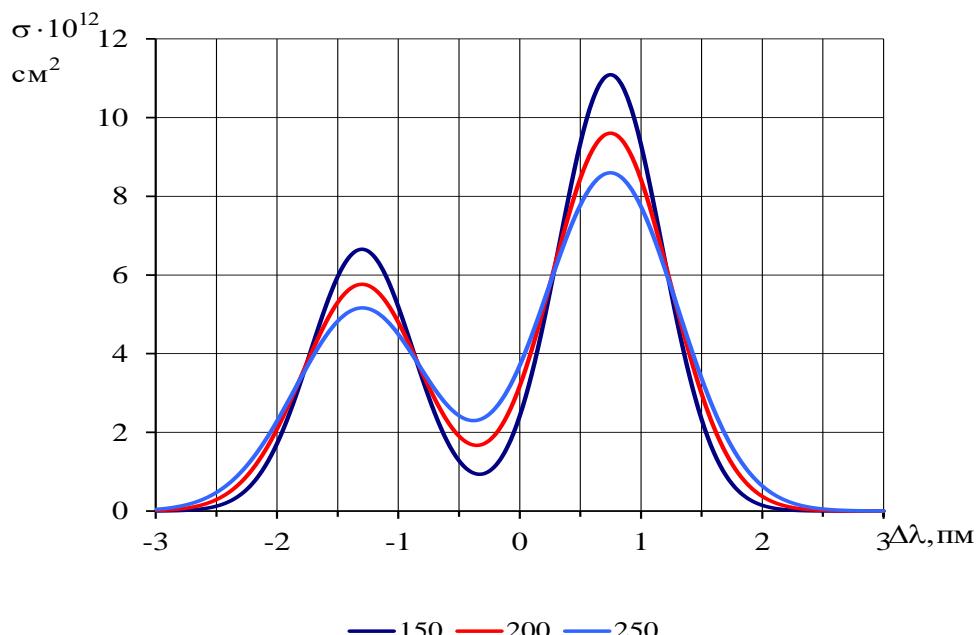


Рисунок 3.3 – Перетин поглинання атому натрія

У випадку атома натрію при температурі близько  $200^{\circ}\text{K}$ , збільшення діаметра розсіювання, що виникає через внесок сусідньої лінії, є дуже невеликим, оскільки інтенсивність сусідньої компоненти значно зменшується на межах інтервалу частот, відповідного розсіюванню ліній. Використовуючи відповідні співвідношення та формулу (3.8), отримуємо конкретні значення

максимальних перетинів розсіювання та ліній при зазначеній температурі  $-9,5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$  і  $5,7 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$ . У всіх розрахунках враховано, що сила осцилятора для компонент D2 лінії пропорційна їхнім статистичним вагам, та взято, що сила осцилятора D2 лінії дорівнює 0,76 [5].

На рис. 3.4 представлена нормовані спектри випромінювання лазера і спектр поглинання домішки. Змінюючи довжину хвилі випромінювання відносно лінії поглинання можливо оцінити ефективність взаємодії випромінювання з атмосферною речовиною і визначити оптимальний варіант настроювання.

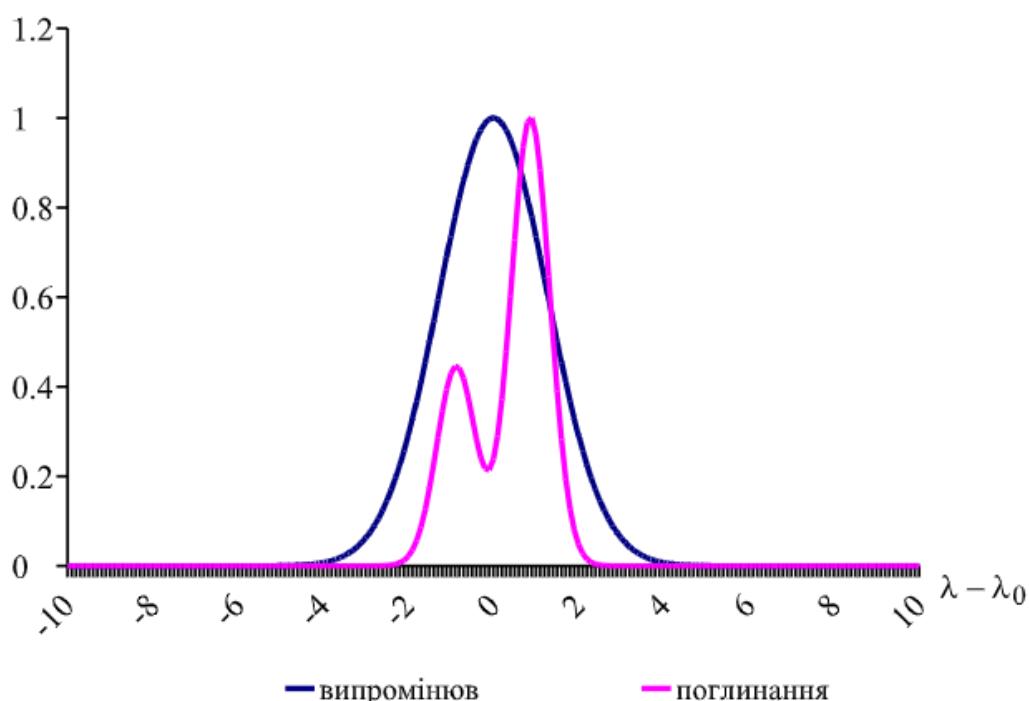


Рисунок 3.4 – Залежність перетину від ширини спектра випромінювання

З використанням спектру поглинання натрієвої лінії та інформації про спектр випромінювання лазера можна розрахувати ефективний діаметр розсіювання за допомогою формули (3.2). Результати числових розрахунків для ефективного діаметра розсіювання при температурі  $200^{\circ}\text{K}$  подані на рис. 3.5 для двох ключових випадків налаштування генератора – на центр ваги D2 лінії та на максимальне значення компоненти. У розрахунках використовувалася гаусова апроксимація спектра випромінювання лазера.

В першому випадку налаштування лазера, коли ширина його спектральної лінії випромінювання приблизно рівна сумарній ширині контуру поглинання атома, призводить до максимального значення ефективного перетину розсіювання. У другому випадку спостерігається монотонне зростання ефективного перетину розсіювання, проте збільшення цього перетину при звуженні смуги випромінювання є невеликим. Зменшення ширини спектральної лінії лазера менше ширини контуру поглинання атома в першому випадку є неефективним, а в другому випадку – малоєфективним. При ширині спектра випромінювання, яка перевищує сумарний контур поглинання атома, обидва способи налаштування призводять до практично однакового результату.

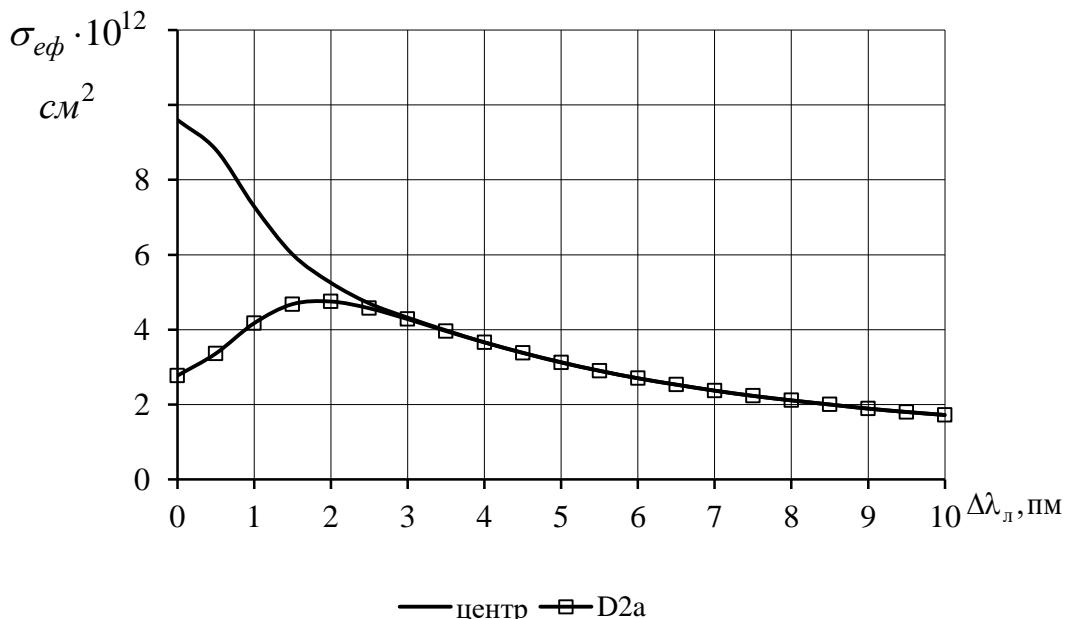


Рисунок 3.5 – Залежність перетину від ширини спектра випромінювання

Оскільки лідарні дані є результатом накопичення фотовідліків за багатьма реалізаціями, ширину спектра випромінювання лазера слід розглядати як середнє значення за період підсумовування, з урахуванням короткочасної і тривалої нестабільності лазерної лінії. З цієї причини важливо проаналізувати вплив нестабільності спектра випромінювання на зміну перетину розсіювання. Для цього в формулу для розрахунку ефективного перетину розсіювання

вводиться значення зсуву довжини хвилі  $\Delta\lambda_{\text{л}}$ . Числові розрахунки для гаусових форм спектра і при різній ширині лазерної лінії представлени на рис. 3.6.

Отримані результати розрахунків свідчать, що при скороченні ширини спектральної лінії вимоги до її стабільності різко зростають. Наприклад, при прийнятній погрішності, обумовленій невизначеністю значення перетину розсіювання, рівної 10%, максимальне допустиме розстроювання для ширини спектра випромінювання 0,5 пм, 3 пм і 10 пм складає відповідно 0,2 пм, 0,4 пм і 1,5 пм. Забезпечення нестабільності довжини хвилі генерації менше 0,3 пм є значущою проблемою, особливо враховуючи, що при типових довжинах резонаторів, що знаходяться в межах 0,5-1 метра, це значення приблизно рівне міжмодовому інтервалу.

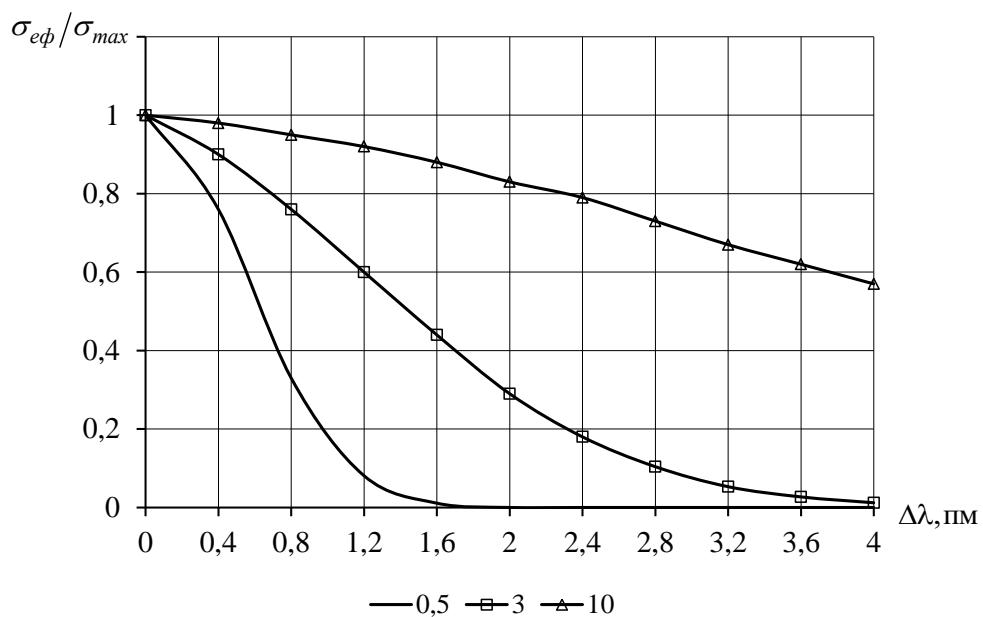


Рисунок 3.6 – Залежність нормованого ефективного перетину розсіювання від зсуву довжини хвилі при зміні ширини спектра випромінювання

Аналізуючи рис. 3.6, можна зробити висновок, що при налаштуванні генератора на пік поглинання смуги частот випромінювання, менші значення доплерівського розширення, викликані можливими змінами температури в висотному інтервалі домішкового шару, можуть привести до появи помилок в

оцінці перетину резонансного розсіювання. Розрахунки демонструють (рис. 3.6), що апріорна невизначеність температури практично не вносить похибку в розрахунок, якщо півширина спектра випромінювання передавача дорівнює або перевищує півширину сумарного доплерівського контуру поглинання досліджуваного атома. Таким чином, підбиваючи підсумок вищевикладеного, можна зазначити, що зменшення ширини спектра випромінювання лідару з метою підвищення ефективного перетину розсіювання має сенс лише до значень, що приблизно визначаються півшириною контуру поглинання досліджуваної домішки.

### 3.5 Оцінка гранично допустимих значень енергії випромінювання передавача

Згідно з рівнянням лазерної локації (3.1), щоб підвищити інтенсивність сигналу зворотного розсіювання, рекомендується збільшувати енергію випромінювання передавального пристрою. Це також сприяє покращенню точності відновлення висотного розподілу концентрації досліджуваної домішки на основі даних зондування атмосфери. Оскільки обробка даних зондування атмосфери передбачає пуссонівську статистику розподілу фотоелектронів на виході фотоелектронного перетворювача, то відомо, що відносна статистична похибка вимірювання сигналу є оберненою пропорційною кореню квадратному з числа фотовідліків [5]. Попередні оцінки за лідарним рівнянням показують, що при типових параметрах лідарної апаратури та висотному дозволі близько 1 км рівні сигналу не перевищують декількох десятків фотоелектронів. Для зменшення статичної помилки зазвичай вдається до накопичення сигналу протягом багатьох імпульсів. Однак це може призводити до втрати інформації про динаміку досліджуваного шару через збільшення тривалості сеансу зондування. Зі збільшенням інтенсивності сигналу зворотного розсіювання покращується відношення сигнал-шум на вході приймального пристрою, а

помилка, пов'язана зі статистичним характером сигналу, зменшується. Проте збільшення інтенсивності випромінювання може викликати ефекти насичення атомного переходу та нелінійну залежність між падаючою та розсіяною інтенсивностями. Ця обставина, пов'язана з характеристиками випромінювача лідара, розглядається в рамках даної роботи.

Коли електромагнітне випромінювання взаємодіє з речовиною, три основні процеси відіграють роль: поглинання, спонтанне випромінювання і вимушене випромінювання. У контексті лазерної локації для отримання інформації використовується спонтанне випромінювання, оскільки цей процес забезпечує атомам випромінювання енергії, яку вони поглинули. Спонтанне випромінювання, завдяки своєму ізотропному розсіюванню, потрапляє в апертуру приймального пристрою. У випадку достатньої інтенсивності падаючої хвилі вимушене випромінювання, що розповсюджується у напрямку падаючого випромінювання, може вносити значний внесок і викликати похиби в вимірювання. Рівняння балансу заселеності в стаціонарному наближенні для двох рівнів атома записуються так [1]:

$$I \cdot \sigma \cdot n_0 - \frac{h\nu \cdot n_1}{\tau} - I \cdot \sigma \cdot n_1 = 0 \quad (3.10)$$

$$n_0 + n_1 = n \quad (3.11)$$

де  $n$  — концентрація атомів;

$n_0, n_1$  — кількість населення відповідно основного і збудженого станів;

$I$  — інтенсивність падаючого випромінювання.

Останній член у рівнянні (3.10) вказує на потужність вимушеного випромінювання в одиниці об'єму. Також слід відзначити, що поглинання зменшується через зменшення населеності основного рівня. У випадку, коли інтенсивність випромінювання на висоті зондування є низькою, можна

ігнорувати вимушене випромінювання. Враховуючи, що  $n_0 \approx n$ , рівняння можна записати:

$$I \cdot \sigma \cdot n = \frac{h\nu \cdot n_1}{\tau} \quad (3.12)$$

В лазерній локації важливо враховувати вплив електромагнітного випромінювання на речовину, що може викликати три основні процеси: поглинання, спонтанне випромінювання і вимушене випромінювання. У контексті лідарної локації використовується спонтанне перевипромінювання, оскільки його ізотропний характер дозволяє враховувати його в приймальному пристрої. Проте, при високій інтенсивності падаючої хвилі вимушене випромінювання також може внести суттєвий внесок у вимірювання, створюючи похибку в результаті. Розглянемо більш загальний випадок, коли вимушеним випромінюванням не можна знехтувати. Для цього перше рівняння системи (3.10) перепишемо у вигляді рівняння:

$$I \cdot \sigma \cdot (n - n_1) - \frac{h\nu \cdot n_1}{\tau} - I \cdot \sigma \cdot n_1 = 0 \quad (3.13)$$

Після перетворень отримаємо:

$$\frac{h\nu \cdot n_1}{\tau} = I \cdot \sigma \cdot n \cdot (1 - 2\dot{n}_1) \quad (3.14)$$

де  $\dot{n}_1 = n_1/n$  – відносна заселеність збудженого стану.

Порівнюючи отримане вираз з (3.12), можна визначити відносну похибку визначення концентрації, яка в цьому випадку дорівнює:

$$\delta = 2\dot{n}_1 \quad (3.15)$$

Задаючи допустиме значення похибки, можна встановити граничне значення інтенсивності лазерного випромінювання на висоті зондування. Шляхом розв'язання рівняння (3.14) відносно  $I$  отримуємо:

$$I = I_s \cdot \frac{0,5 \cdot \delta}{1 - \delta} \quad (3.16)$$

де  $I_s = h\nu/(\sigma\tau)$  — представляє собою інтенсивність насичення переходу, при якій потужність вимушеного випромінювання дорівнює потужності спонтанного розпаду.

Отриманий вираз можна перетворити до вигляду:

$$I_0 = \frac{0,5 \cdot \delta}{1 - \delta} \quad (3.17)$$

де  $I_0 = I/I_s$  — відносна інтенсивність випромінювання.

Рис 3.6 ілюструє залежність допустимої інтенсивності пучка від встановленої похибки вимірювання концентрації домішки. В рівнянні (3.10), для спрощення запису, були проігноровані індекси частоти для перетину і інтенсивності випромінювання. Тому в загальному випадку для отримання остаточних виразів необхідно провести інтегрування по спектру. У виразі для інтенсивності насичення варто врахувати ефективне значення перетину розсіювання. З огляду на залежність перетину розсіювання від ширини спектра випромінювання, гранично допустима інтенсивність випромінювання також змінюватиметься відповідно при зміні ширини спектра.

Для оцінки допустимої енергії випромінювання передавача, що випромінює на довжині хвилі натрієвої лінії, припустима відносна похибка вимірювання концентрації не повинна перевищувати 5%. Це допустимо в більшості випадків. Для спрощення аналізу припускається, що інтенсивність випромінювання лазера розподілена рівномірно по перетину пучка, а форма

імпульсу – прямокутна, тобто потужність постійна протягом тривалості імпульсу.

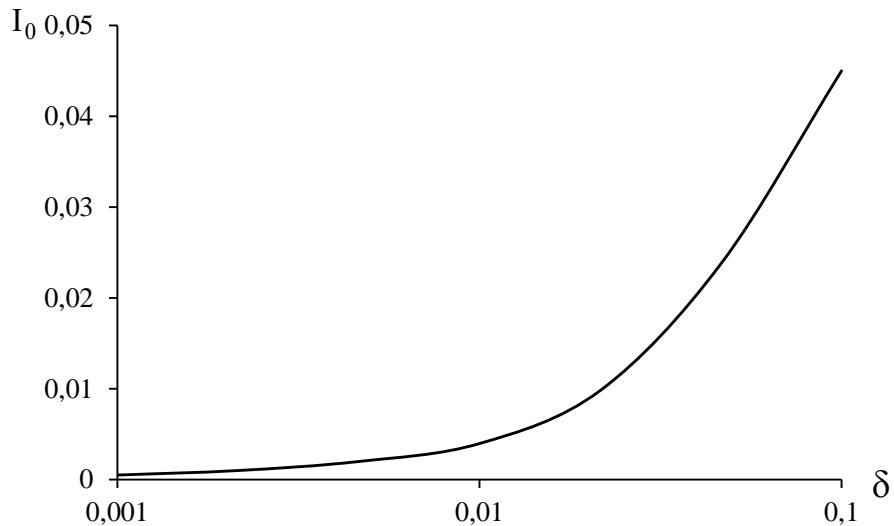


Рисунок 3.6 — Залежність допустимої відносної інтенсивності випромінювання від заданої похибки визначення концентрації

Спираючись на характеристики лідара з ламповим накачуванням для нічних спостережень, які включають тривалість імпульсу 3,3 мікросекунди, розбіжність випромінювання 1 мрад, та ширину спектральної лінії 5 пікометрів, можна визначити ефективний перетин розсіювання  $\sigma_{\text{еф}} = 3,3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$ . Звідси, з огляду на час життя збудженого стану атома натрію  $\tau = 1,6 \cdot 10^{-8}$  сек [5], отримаємо інтенсивність насичення переходу  $I_s = 6,3 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ ,  $I = 16,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ . На висоті близько 100 км діаметр пучка випромінювання буде приблизно 100 метрів при зазначеній розбіжності. Таким чином, допустима потужність передавача без урахування ослаблення в атмосфері дорівнює  $P = I \cdot S = 16,6 \text{ МВт}$ , або, переходячи до енергії випромінювання при заданій тривалості імпульсу, отримуємо  $E = P \cdot \tau \approx 50 \text{ Дж}$ . Отримана енергія виявляється значною і перевищує характеристики існуючих випромінювачів, не будучи обмеженням. Однак ситуація може змінитися при необхідності зменшення діаграми спрямованості передавача для підвищення відношення сигналу до фонової складової. Для роботи в денних умовах, коли розбіжність випромінювання

повинна бути зменшена, допустима енергія випромінювання в імпульсі зменшиться на два порядки до 0,5 Дж. Такий аналіз підкреслює, що вибір енергії випромінювання передавача визначається компромісом між похибкою визначення концентрації, обумовленою вимушеним випромінюванням, і статистичною похибкою, що залежить від енергії випромінювання в імпульсі.

Висновки з даного розділу можуть бути сформульовані наступним чином:

- У випадку системи на резонансній флуоресценції лідарної локації, ефективний перетин розсіювання використовується для оцінки ступеня взаємодії лазерного випромінювання з атмосферною речовиною.
- Розрахунки, проведені в даному розділі, свідчать, що ефективний перетин розсіювання досягає свого максимального значення при ширині спектральної лінії випромінювання, приблизно рівній сумарній ширині контуру поглинання.
- Зменшення ширини спектра випромінювання лідaru з метою підвищення ефективного перетину розсіювання має сенс лише до значень, що визначаються приблизно півшириною контуру поглинання досліджуваної домішки.
- З метою забезпечення заданої точності визначення концентрації речовини, необхідно в кожному конкретному випадку визначати відповідне значення гранично допустимої потужності випромінювання лідaru.

## ВИСНОВКИ

Лідар є одним з найбільш перспективних інструментів, здатних дистанційно і безконтактно проводити вимірювання параметрів та складових атмосфери. Висока чутливість виявлення домішок атмосфери, можливість отримання висотного розподілу їх концентрації та висока просторова роздільність роблять лідари унікальним інструментом для дослідження атмосфери. Лідари на резонансних ефектах характеризуються ретельним підбором довжини хвилі випромінювання лазера, яке збуджує молекули на частоті поглинання і призводить до резонансного розсіювання. Цей метод успішно застосовується для вимірювання концентрацій атомів натрію і калію на великих висотах до 100 км.

В магістерській роботі були проведені розрахунки які свідчать про те, що ефективний перетин розсіювання, від якого залежить розсіювана енергія і, відповідно, точність оцінки концентрації атмосферної речовини, сягає свого максимального значення при ширині спектральної лінії випромінювання приблизно рівній сумарній ширині контуру поглинання. При цьому для забезпечення заданої точності визначення концентрації речовини необхідно в кожному конкретному випадку визначати відповідне значення гранично допустимої потужності випромінювання лідaru.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

- 1 Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование: Пер. с англ. – М: Мир, 1987. – 550 с.
- 2 Привалов В. Е. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере : учеб. пос. / В. Е. Привалов, В. Г. Шеманин. — СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. — 56 с
- 3 Андреев Ю. М. Лидарные системы и их оптико-электронные элементы / [Ю. М. Андреев, В. Г. Воеводин, П. П. Гейко и др.]; под общей ред. чл.-кор. РАН М. В. Кабанова. — Томск: Изд-во Институт ОА СО РАН, 2004. — 526 с
4. Лагутин М.Ф. Лазерная резонансная локация в экологии космического пространства // Радиотехника. 1996. Вып. 100/96. С. 173-187.
- 5 Зарудный А.А., Плетенев В.Г., Верхоробин А.Л. Лазер повышенной спектральной яркости для исследования атмосферы // Радиотехника. 1998. Вып. 102. С. 170-175.
- 6 Тулинов Г. Ф., Дудоладов Ю.П., Иванов М. С. и др. Техника и результаты лазерного зондирования верхней атмосферы полярной области // Ионосферные исследования. 1982. № 32. С. 104
- 7 Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии. М.: Мир, 1986. – 496 с
- 8 Althausen D., Muller D., Ansmann A., Wandinger U., Hube H., Clauder E., Zorner S. Scanning 6– wavelength 11–channel aerosol lidar // J. Atmos. and Oceanic Technol. – 2000. – V. 17. – P. 1469–1482
- 9 Клышко Д.В. Рассеяние света // Наука и жизнь. 1988. № 1. С. 24–32
- 10 Зарудный А.А., Мегель Ю.Е., Лагутин М.Ф. Лидар для исследования мезосферной примеси // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 83-89
- 11 Bib.convdocs [Електронний ресурс] / Флуоресцентный лидар для дистанционного зондирования каменных объектов культурного наследия – Режим доступу

[https://bib.convdocs.org/v31315/парфенов\\_в.а.\\_электронный\\_конспект.\\_лазерные\\_методы\\_в\\_экологии?page=7](https://bib.convdocs.org/v31315/парфенов_в.а._электронный_конспект._лазерные_методы_в_экологии?page=7) (дата звернення 12.09.23)

12 Иванов В. И. Многофункциональные лидарные системы / В. И. Иванов, И. А. Малевич, А. П. Чайковский. — Mn. : Университетское, 1996. — 286 с

13 Аршинов Ю. Ф. КР-лидар для дистанционного контроля промышленных загрязнений атмосферы / Ю. Ф. Аршинов, С. М. Бобровников // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. — Томск : Изд-во СО РАН, 1997. С. 112—130.

14 Петрук В. Г. Спектрофотометрія світlorозсіювальних середовищ (теорія і практика оптичного вимірювального контролю) : монографія (Ч. II). / В. Г. Петрук. — Вінниця: Універсум-Вінниця, 2000. — 207 с

15 Матвиенко Г.Г., Банах В.А., Бобровников С.М. и др. Развитие технологий лазерного зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т.22. №10. С. 915–930.

16 Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии. М.: Мир, 1986. – 496 с

17 Лазерная система для возбуждения флуоресценции атомов натрия. Руководство по эксплуатации. Новосибирск, 2013 – 28 с.

18 Плачек Г. Релеевское рассеяние и Раман-эффект, пер. с нем., Харьков-Киев:ОНТИ НКТП, 1935. – 174 с.

19 Маричев В.Н., Бочковский Д.А. Исследование возможностей лидарных измерений температуры атмосферы Земли из космоса. // Оптика атмосферы и океана. 2014. № 10. С. 399-406

20 [Електронний ресурс] / Об'єктив Ньютона – Режим доступу [https://studbooks.net/2128814/matematika\\_himiya\\_fizika/obektiv\\_nyutona](https://studbooks.net/2128814/matematika_himiya_fizika/obektiv_nyutona) (дата звернення 05.10.23)

21 [Електронний ресурс] / Пост – Режим доступу <https://habr.com/ru/post/441706/> (дата звернення 15.09.230)