

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем  
(повна назва)

**АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)  
ГЮІК.ХХХХХХ.001 ПЗ

Вибір параметрів резонансного лідару  
(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи РПСКМ-19-1  
Лапошина О.К.

(прізвище, ініціали)

спеціальності 172 Телекомунікації та  
радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма: Радіоелектронні пристрої,  
системи та комплекси

(повна назва освітньої програми )

Керівник Доцент, к.т.н. Зарудний О.А.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

О.І. Цопа  
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Не містить відомостей заборонених для відкритого публікування

Керівник

доцент, к.т.н. Зарудний О.А.

Студентка

Лапошина О.К.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телкомунікації та радіотехніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Радіоелектронні пристрої, системи та комплекси

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

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

## ЗАВДАННЯ

### НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Лапошиній Ользі Костянтинівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вибір параметрів резонансного лідару

затверджена наказом по університету від 02 листопада 2020 р. № 1507 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 11 грудня 2020р.

3. Вихідні дані до роботи Науково-технічні публікації та інтернет-джерела за тематикою атестаційної роботи

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Огляд лідарних технологій дослідження навколишнього середовища 2 Методи та апаратура лідарних досліджень атмосфери та лідарне рівняння 3 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) Слайди презентації

---



---



---



---



---



---



---



---



---

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	Доцент, к.т.н. Зарудний О.А.		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури та інтернет-джерел	03.11.2020	виконано
2	Огляд лідарних технологій дослідження	06.11.2020	виконано
3	Методи та папаратура лідарних досліджень	18.11.2020	виконано
4	Результати аналізу та розрахунки параметрів	24.11.2020	виконано
5	Написання пояснювальної записки	30.11.2020	виконано
6	Підготовка презентації	02.12.2020	виконано

Дата видачі завдання 02 листопада 2020 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Доцент, к.т.н. Зарудний О.А.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська атестаційна робота складається з пояснювальної записки, котра містить: 81 сторінок тексту, 19 рисунків, 2 таблиць, 21 джерел 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 навколишнього 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 аерозолі в діапазоні довжин хвиль від 355 до 1064 нм. Оцінюються параметри багатохвильового лідара для моніторингу аерозолі в висотному діапазоні 1-10 км.

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

## ABSTRACT

The master's degree work consists of an explanatory note containing: 81 pages of text, 19 figures, 2 tables, 21 sources and 2 appendices.

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

The paper analyzes 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

ВСТУП	8
1 Огляд лідарних технологій дослідження навколишнього середовища	10
1.1 Устрій та принцип дії лідару	10
1.2 Принцип роботи лідара для атмосферних досліджень	12
1.3 Типова структурна схема лідару	13
1.4 Лазери, що використовуються в лідарах	15
1.5 Оптичні схеми об'єктів лідарів	17
1.5.1 Об'єктив Ньютона	19
1.5.1.1 Багатохвильовий раманівський лідар MRL-400	20
1.5.1.2 Багатохвильовий аерозольний лідар PL-200	21
1.5.2 Об'єктив Касегрена	22
1.5.2.1 Стаціонарний лідарний комплекс МВЛ-60	23
1.5.2.2 Багатохвильовий лідар з раманівськими каналами	24
1.5.3 Об'єктив Грегорі	25
1.6 Методи вимірювання відстані до об'єкту	26
1.6.1 Триангуляційний	26
1.6.2 Фазовий	27
1.6.3 Імпульсний	27
1.7 Відмінності побудови лідарів для моніторингу атмосфери	28
2 Методи та апаратура лідарних досліджень атмосфери та лідарне рівняння	32
2.1 Методи лідарних досліджень атмосфери	32
2.1.1 Метод диференційного поглинання	32
2.1.2 Метод диференційного поглинання та розсіювання	33
2.1.3 Метод аерозольного розсіювання	33

2.1.4	Метод Релеєвського розсіювання	34
2.1.5	Метод спонтанного комбінаційного розсіювання	35
2.1.6	Метод резонансного спонтанного комбінаційного розсіювання	36
2.1.7	Метод резонансного розсіювання	37
2.1.8	Молекулярна резонансна флуоресценція	38
2.1.9	Порівняльний аналіз лідарних методів дослідження атмосфери	40
2.2	Лідарне рівняння	43
2.3	Лідарна апаратура і методика резонансного зондування домішок	46
3	Результати аналізу та розрахунки параметрів резонансного лідару	51
3.1.	Характеристика і природа домішкових шарів у верхній атмосфері	51
3.2	Особливості побудови резонансного лідару	53
3.3	Аналіз рівняння оптичної локації стосовно резонансного лідару	54
3.4.	Аналіз спектра поглинання атома і вплив ширини спектра випромінювання на ефективний перетин розсіювання	57
3.5	Оцінка гранично допустимих значень енергії випромінювання передавача	64
	ВИСНОВКИ	70
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	71
	ДОДАТОК А	73
	ДОДАТОК Б	80

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БВЧМ – безперервне випромінювання з частотною модуляцією

ДІ – дискримінатор імпульсів

ДП – диференціальне поглинання

ДПР – диференціальне поглинання і розсіювання

ІДЛ – імпульсний детектор лазеру

ККД – коефіцієнт корисної дії

КР – комбінаційне розсіювання

ЛА – лідарна апаратура

ЛЛС – лазерна локаційна система

ЛПК – лампи з порожнім катодом

МЕМС – мікроелектромеханічна система

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 надвузькою смугою випромінювання, сумісну з шириною спектру досліджу-

ваної 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 навколишнього середовища;
- огляд методів та варіантів побудови апаратури для лідарних досліджень атмосфери;

- аналіз впливу спектральних та енергетичних характеристик випромінювання резонансного лідару на ефективність взаємодії з атомами домішки та точності виміру їхньої концентрації.

# 1 ОГЛЯД ЛІДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДОСЛІЖДЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

## 1.1 Устрій та принцип дії лідару

Лідар – технологія отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища відбиття світла і його розсіювання в прозорих і напівпрозорих середовищах. Як прилад, лідар є оптичний локатор для дистанційного зондування повітряних і водних середовищ. Також до лідара відносять оптичні локатори, які дозволяють дистанційно отримувати інформацію про тверді об'єкти.

Технологія була створена в 1960-х роках і спочатку призначалася для відстеження супутників і військових цілей. Як і LiDAR, ідея мала на увазі використання світла для відстеження положення об'єктів.

Вимірюючи, як швидко світло потрапляє в щось і повертається можна визначити положення цього об'єкта.

Оптичний датчик LIDAR розшифровується як «Light Identification Detection and Ranging» – дослівно, система світлової ідентифікації, виявлення та визначення дальності. У датчику використовуються електромагнітні хвилі інфрачервоного діапазону, за допомогою яких визначається відстань до об'єкту, що знаходиться попереду (транспортного засобу), а також його швидкість. Лідар може використовуватися для визначення часток вологи в атмосфері, ліній дорожньої розмітки. За своїми функціями лідар виступає в якості альтернативи автомобільного радара, тому інша його назва лазерний радар. Перевагами лідара є менший розмір (можна встановити в будь-якому місці), великий кутовий дозвіл (близько 180°), значний радіус дії (до 250 м), порівняно невисока вартість. Доведено, що інфрачервоні промені безпечні для людського ока.

Робота лідара полягає в тому, що в якості активного джерела використовують інфрачервоний світлодіод або лазер, промені якого миттєво поширюють-

ся в середовищі. Поруч з випромінювачем розташований світлочутливий приймач – він і вловлює відображення (рис. 1.1).

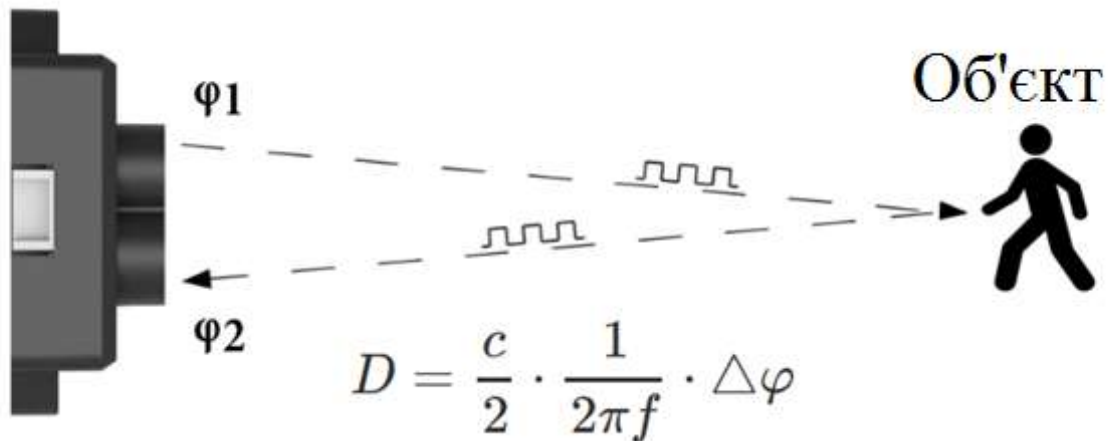


Рисунок 1.1 – Принцип вимірювання відстані до об'єкту лідаром

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

Отримавши час, за який повернулася відбита хвиля, ми можемо визначити відстань до об'єкта в полі зору датчика. Подібний принцип визначення дистанції називають часопролітним – від англійського Time-of-flight (ToF).

Разом з тим, лазерний радар чутливий до зміни рельєфу дороги (промені можуть відбиватися від поверхні дороги і спотворювати інформацію). Ефективність лідара знижується в поганих погодних умовах (дощ, сніг, туман), а також при забрудненні датчика.

Лідари затребувані і користуються популярністю завдяки перевагам використовуваних в них лазерах:

- когерентність випромінювання;
- мала довжина хвилі випромінювання і, як наслідок, малі втрати через розбіжність;
- миттєва потужність випромінювання.

Сукупність цих властивостей робить використання лідара незамінним на дистанціях від сотень метрів до кількох кілометрів.

## 1.2 Принцип роботи лідара для атмосферних досліджень

Імпульсне випромінювання лазера надсилається в атмосферу. Потім, розсіяне атмосферою в зворотному напрямку, випромінювання збирається телескопом і реєструється фотоприймачем з подальшим оцифруванням сигналів (рис. 1.2).

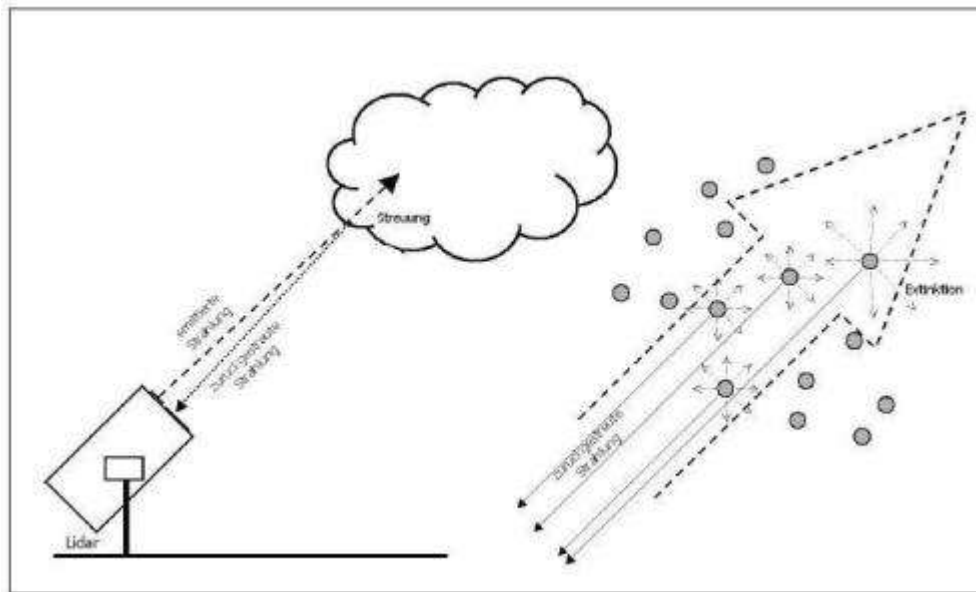


Рисунок 1.2 – Атмосферний лідар імпульсної дії

Лідар запускає швидкі короткі імпульси лазерного випромінювання на об'єкт (поверхню) з частотою до 150000 імпульсів в секунду. Датчик на приладі вимірює проміжок часу, необхідний для повернення імпульсу. Світло рухається з постійною і відомою швидкістю, тому лідар може обчислити відстань між ним і цілі з високою точністю.

Існують дві основні категорії імпульсних лідарів: мікроімпульсні і високоенергетичні системи.

Мікроімпульсні лідари працюють на більш потужній комп'ютерній техніці з великими обчислювальними можливостями. Ці лазери меншої потужності і класифікуються як "безпечні для очей", що дозволяє використовувати їх практично 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, температуру, тиск, вітер, вологість і концентрацію газів в атмосфері

### 1.3 Типова структурна схема лідару

Більшість лідарів складається з трьох частин (рис. 1.3):

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



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

Передавальна частина лідару містить джерело випромінювання – лазер і оптичну систему для формування вихідного лазерного пучка, тобто для управління розміром вихідної плями і розбіжністю пучка.

В абсолютній більшості конструкцій випромінювачем служить лазер, який формує короткі імпульси світла високої миттєвої потужності. Періодич-

ність проходження імпульсів або модульована частота вибирається так, щоб пауза між двома послідовними імпульсами була не меншою, ніж час відгуку від виявлених цілей (які можуть фізично знаходитися далі, ніж розрахунковий радіус дії приладу).

Вибір довжини хвилі залежить від функції лазера і вимог до безпеки і скритності приладу; найбільш часто застосовуються Nd: YAG-лазери і довжини хвиль:

-1550 нм – інфрачервоне випромінювання, невидиме ні оку людини, ні типовим приладам нічного бачення. Око не здатне сфокусувати ці хвилі на поверхні сітківки, тому травматичний поріг для хвилі 1550 істотно вище, ніж для більш коротких хвиль. Однак ризик пошкодження очей на ділі вище, ніж у випромінювачів видимого світла – так як око не реагує на ІЧ випромінювання, то не спрацьовує і природний захисний рефлекс людини;

- 1064 нм – ближнє інфрачервоне випромінювання лазерів, невидиме оку, але виявляєме приладами нічного бачення;

- 532 нм – зелене випромінювання неодимового лазера, ефективно «пробиває» маси води;

- 355 нм – ближнє ультрафіолетове випромінювання.

Приймальна частина складається з об'єктива (телескоп), спектрального та/або просторових фільтрів, поляризованого елемента і фотодетектора. Випромінювання, відображено-розсіяне від досліджуваного об'єкта, концентрується приймальною оптикою (телескопом), а потім проходить через аналізатор спектру. Цей прилад служить для виділення інтервалу довжин хвиль, в якому проводяться спостереження, і, отже, для відсічення фонового випромінювання на інших довжинах хвиль. Аналізатор може бути або складний, що ретельно настроюється моно- або поліхроматор, або у вигляді набору вузькосмугових фільтрів, включаючи фільтр відсічення випромінювання на довжині хвилі лазерного передавача.

Випромінювач і приймальний блок можуть бути далеко рознесені один від одного або виконані в єдиному блоці, що в останні роки є звичайним. Осі

випромінювача і приймача можуть бути суміщені (коаксіальна схема) або рознесені (біаксіальна схема).

Система управління (в) виконує наступні завдання:

- управління режимом роботи лідара;
- управління частотою зондуючого випромінювання лазера;
- вимірювання енергії у вихідному і прийнятому двохчастотному лазерному пучку на обох частотах;
- обробка результатів, тобто отримання спектральних характеристик атмосфери, визначення наявності і концентрації домішок за наявними в базі даних комп'ютера «спектральних портретів» молекул;
- управління системою наведення лідара на досліджуваний об'єкт.

#### 1.4 Лазери, що використовуються в лідарах

Для дистанційного зондування становлять інтерес лазери, які здатні генерувати спектрально обмежені імпульси випромінювання наносекундної тривалості високої потужності і невеликої кутової розбіжності. Основні види лазерів, які переважно використовуються для зондування атмосфери, зазначені в табл. 1 [2]. Конкретний тип лазера і його конструкція визначаються з урахуванням умов застосування лідарної системи. Так, при зондуванні на одній фіксованій довжині хвилі, або в невеликому спектральному діапазоні, доцільно використовувати серійні лазери, або джерела когерентного випромінювання широкого призначення для різних спектроскопічних досліджень. У лідарних системах, призначених для проведення широкоспектральних досліджень, випромінювач може бути виготовлений на основі об'єднання декількох окремих лазерів. Однак таке технічне рішення не може забезпечити високих експлуатаційних показників, оскільки випромінювачі виявляються громіздкими і незручними в роботі. Тому, в таких випадках, а також на особливі вимоги до характеристик і конструкції лазера (лідари для багатоконпонентного газового аналізу, мобільні лідари та ін.) розробляються спеціальні пристрої, які за технічними хара-

ктеристиках і конструкцією істотно відрізняються від квантових генераторів. Ще ширші можливості по застосуванню лазерів відкриваються при використанні генерації вищих гармонік, параметричної конверсії або комбінаційного зсуву лазерів, які створюються, на барвниках. Застосування модуляції добротності дає можливість отримувати пікову потужність 1...40 МВт при тривалості імпульсу 10...30 нс. Прийнятними для дослідження є тільки мінімальні кути розбіжності пучка, а частота повторення імпульсів близько 10 Гц. Подвоєння або потроєння частоти досягається за рахунок застосування відповідних нелінійних кристалів. Ефективність перетворення залежить від оптичної якості кристалу, довжини хвилі, інтенсивності і 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		
АР і МР	Неодимове скло	1,060 і гармоніки
	Алюмоітрієвий 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
	Ексімерні лазери*	0,2—0,35
	Лазери на центрах фарбування в іонних кристалах*	0,7—1,5
Зондування гідрозолю		
АР і МР	2-га гармоніка лазера на неодимовому склі	0,530
	2-га гармоніка лазера на алюмоітрієвому гранаті	0,532
	Пари міді	0,510 і 0,578
Аналіз газового складу атмосфери		
КР	Гармоніки випромінювання лазерів на неодимовому склі і алюмоітрієвому гранаті	0,26; 0,35; 0,53
	Рубін	0,347 (2-га гармоніка)
	Азотні лазери	0,337
	Ексімерні лазери*	0,2—0,35
	Барвники	0,26—1,1
РР Резонансне КР РП	Ексімерні 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*	0,7—1,5

## 1.5 Оптичні схеми об'єктивів лідарів

Зворотний сигнал від досліджуваного об'єкта повинен бути перехоплений прийомним об'єктивом лідара, відфільтрований (просторово і спектрально) і спрямований на чутливий майданчик фотоприймача. Все це повинно бути зроблено з максимальною ефективністю, без значних втрат корисного світлового сигналу, зібраного об'єктивом, і з максимальним придушенням всіх завад.

Лазер висвітлює на об'єкті пляму, розмір якої визначається розбіжністю пучка  $2\theta$  і відстанню до об'єкта  $R$ :  $D = 2R \operatorname{tg} 2R(2\theta)$ . Частина відбитого і розсіяного в зворотному напрямку випромінювання збирається об'єктивом. При великих відстанях промені від точки практично паралельні один одному. Призначення об'єктива – зібрати достатню кількість світла від плями і спроектувати пляму на фотоприймач. Тому основними параметрами об'єктива є світлозбиральна площа, фокусна відстань і поле зору.

Для космічних лідарів, коли відстань до досліджуваних шарів атмосфери або землі сягає сотень кілометрів, необхідно використовувати об'єктиви з великим діаметром 1 ... 3 м і навіть більше, щоб зібрати достатньо світла, особливо при роботі в режимах комбінаційного розсіювання або диференціального поглинання. Діаметр  $d$  і 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'єктиву.

Розмір зображення (не більше розміру фотоприймача), еквівалентна фокусна відстань (з урахуванням додаткових перепроєктованих елементів в спектральному блоці приймача) і кут поля зору пов'язані співвідношенням  $a = 2f' \operatorname{tg}$ , яке дозволяє вибрати параметри конкретних схем і підібрати необхідні елементи. У багатьох випадках пляма проектується не на фотоприймач безпосередньо, а в площину польової діафрагми (первинне зображення), яка обмежує поле зору об'єктива.

Регулюючи розміри польової діафрагми, можна змінювати ефективний розмір плями, проєктованого на фотоприймач. Іншими словами, вона дозволяє змінювати просторову роздільну здатність вимірювань, а також зменшувати шумову засіку від багаторазово розсіяного світла. Перепроекування первинного зображення також є способом боротьби з розсіяним в об'єктиві світлом. Коли польова діафрагма має максимальний розмір, здійснюють взаємну юстировку лазера і приймального об'єктива лідара (по максимуму прийнятого сигналу). При вимірах діафрагма має мінімальний розмір. Діафрагма зазвичай буває ірисова або у вигляді диска з отворами різного діаметру.

Оскільки лідар працює з віддаленими об'єктами, об'єктив повинен будувати зображення практично з нескінченності на кінцеву відстань (в фокальній площині). Тобто використовуються телеоб'єктиви. Оптичний розрахунок телеоб'єктива виробляють з урахуванням того, що абераційне розмиття краю зображення повинно бути мінімальним або прийнятним з точки зору світових втрат. У системах типу далекомірів, сканерів, батиметрія діаметр об'єктива невеликий – від 15 до 150 мм. Тому об'єктиви звичайно лінзові.

Типи об'єктивів, що використовуються в лідарах є наступними:

- дзеркальні (рефлектори), які використовують дзеркальні світлозбиральні елементи;

- дзеркально-лінзові (катадіоптричні), у яких в якості оптичних елементів використовуються і дзеркала, і лінзи. Варто відзначити, що у такому разі лінзи за розміром можна порівняти з головним дзеркалом і вони служать для корекції сформованого ним зображення.

Дзеркала можна зробити полегшеними, що важливо для авіаційних і особливо космічних систем. Дзеркальні системи будують за класичними схемами телескопів: Ньютона, Грегорі і Касегрена. Дзеркальні системи завжди мають центральне екранування, навіть в схемі Ньютона, в якій у фокусі на осі розміщений приймач.

При невеликих полях зору в одиниці кутових секунд і малих відносних отворах ( $d/f'$  менше 1:10) замість параболоїда в схемі Ньютона використовують

сферу, переважно з економічних міркувань. Через невисоких вимог до якості зображення (треба тільки зібрати енергію) іноді вдається замінити вторинне гіперболічне дзеркало на сферичне. Можливі також варіанти схеми типу Кассегрена з головним сферичним дзеркалом і вторинним асферичним дзеркалом високого порядку. Такі схеми корисні для космічних лідарів з великими телескопами.

Дзеркальні об'єктиви мають ряд переваг (у порівнянні з лінзовими):

- висока світлосила і роздільна здатність;
- відсутність хроматичної аберації у дзеркал;
- високий коефіцієнт світлопропускання;
- при порівняно нескладній конструкції дзеркальних систем можна отримати досить досконалу корекцію сферичної аберації;
- дзеркальні системи не містять заломлюючих поверхонь і тому зручні для використання в ІК і УФ областях спектру.

Але крім переваг, дзеркальні об'єктиви мають і недоліки:

- складність виготовлення і контролю асферичних поверхонь дзеркал;
- складність юстирування дзеркальних систем;
- складнощі, пов'язані з використанням великих дзеркал (вплив погодних умов, необхідність термостабілізації);
- дзеркальні системи, як правило, мають велику кому, що зменшує корисне поле системи. Даний недолік усувають застосуванням дзеркально-лінзових схем.

### 1.5.1 Об'єктив Ньютона

Схема була запропонована Ісааком Ньютоном в 1668 році. Тут головне (параболічне) дзеркало направляє випромінювання на невелике плоске діагональне дзеркало, розташоване поблизу фокусу (рис. 1.4). Плоске діагональне дзеркало відхиляє пучок випромінювання за межі труби телескопа, де воно потрапляє на приймальний пристрій.

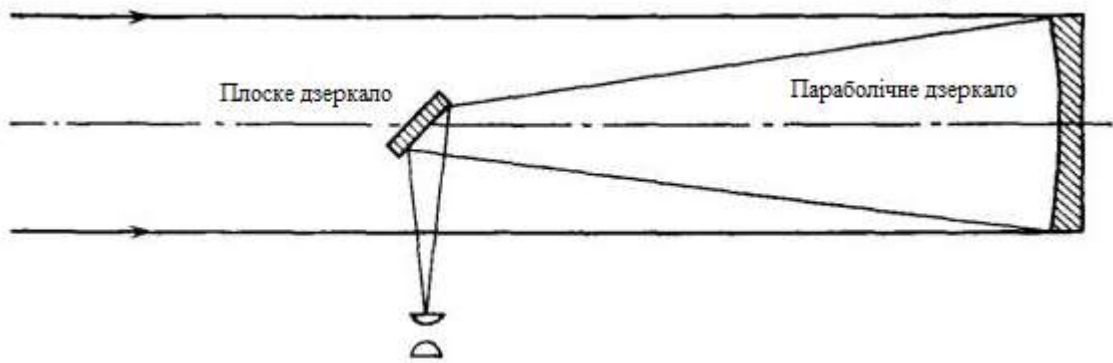


Рисунок 1.4 – Типова структурна схема об'єктиву Ньютона

Схема має мінімальну кількість оптичних елементів, що обумовлює простоту юстування, невисокі вимоги до обробки дзеркал і невисоку вартість виготовлення. Головне дзеркало в силу свого великого розміру вимагає часу до використання при будь-якій зміні температури навколишнього середовища, або термостабілізації. Також потрібно періодичне підстроювання дзеркал, яке схильне втрачатися при транспортуванні і в процесі експлуатації. Система не вільна від аберації коми.

Об'єктив Ньютона використовується в багатьох лідарах. Розглянемо деякі з них.

#### 1.5.1.1 Багатохвильовий раманівський лідар MRL-400 (рис. 1.5) [20]

В основу роботи цього лідара покладено явище комбінаційного розсіювання світла (ефект Рамана) – непружне розсіювання оптичного випромінювання на молекулах речовини (твердого, рідкого або газоподібного), що супроводжується помітною зміною частоти випромінювання. У спектрі розсіяного випромінювання з'являються спектральні лінії, яких немає в спектрі первинного (збудливого) світла. Число і розташування з'явилися ліній визначається молекулярною будовою речовини. Лазер разом з коліматором кріпиться на приймальному телескопі, що дозволяє проводити вимірювання під будь-яким кутом до горизонту.

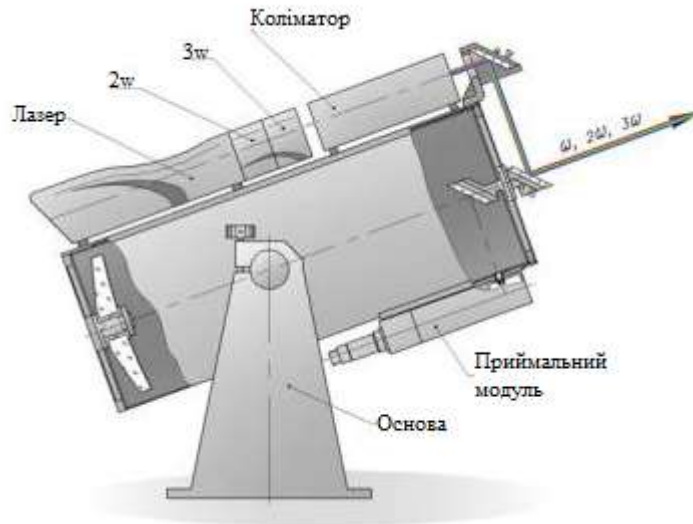


Рисунок 1.5 – Структура лідару MRL-400

Основні характеристики:

- джерело випромінювання Nd: YAG лазер Quantel Brilliant з генератором третьої гармоніки;
- енергія в імпульсі 300/300/200 мДж - 1064/532/355 нм;
- частота повторення 10 Гц;
- зовнішньоосьовий параболічний дзеркальний коліматор з коефіцієнтом збільшення 5 для передавача;
- діелектричні дзеркальні покриття забезпечують 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) [20]

Основні характеристики:

- джерело випромінювання Nd YAG лазер з генератором третьої гармоніки;
- енергія на довжині хвилі 355 нм 70 мДж;
- частота повторення 25 Гц;
- розбіжність пучка <math><1</math> мрад;

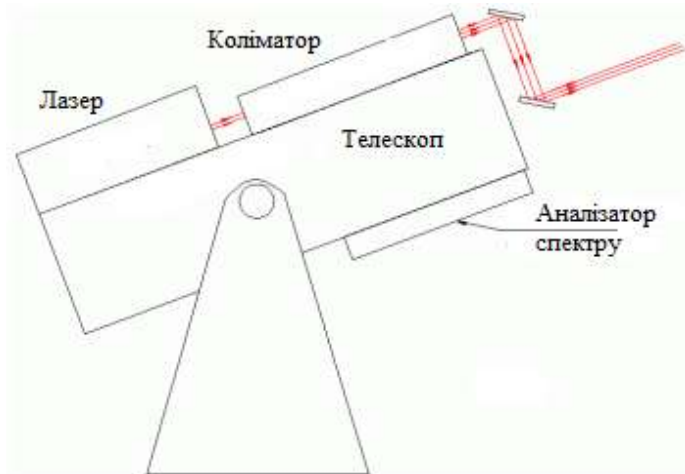


Рисунок 1.6 – Структура лідара PL-200

- зовнішньоосьовий параболічний коліматор з діелектричним покриттям і 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 з фокальним відстанню 970 мм.

### 1.5.2 Об'єктив Касегрена

Схема була запропонована Лорен Касегреном в 1672 році. Головне дзеркало більшого діаметра (увігнуте; в оригінальному варіанті параболічне) відкидає випромінювання на вторинне опукле меншого діаметру (зазвичай гіперболічне) (рис. 1.7) [20].

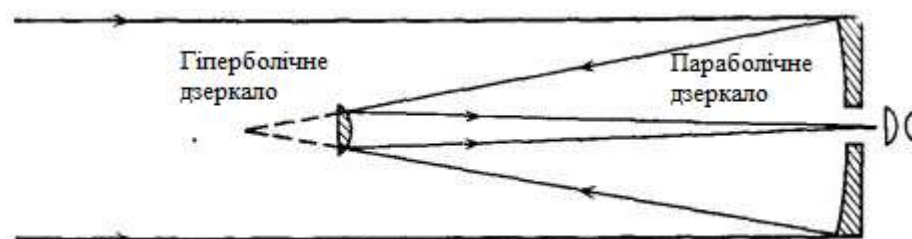


Рисунок 1.7 – Типова структурна схема об'єктиву Касегрена

Вторинне дзеркало розташоване між головним дзеркалом і його фокусом і повна фокусна відстань об'єктива більше, ніж у головного. Об'єktiv при тому ж діаметрі і фокусній відстані має майже вдвічі меншу довжину труби і дещо менше екранування, ніж у Грегорі. Традиційний рефлектор Касегрена складний у виробництві (складні поверхні дзеркал - парабола, гіпербола), а також має не-виправлену аберацию коми. Останній недолік виправлений в різних модифікаціях схеми Касегрена.

Дзеркальний об'єktiv, побудований за схемою Касегрена, користується найбільшою популярністю завдяки поєднанню компактності і можливістю отримання великої еквівалентної фокусної відстані.

Розглянемо деякі лідари, в яких використовується приймальний телескоп, побудований за схемою Касегрена.

#### 1.5.2.1 Стационарний лідарний комплекс МВЛ-60 (рис. 1.8) [20]

Багатохвильовий лідар МВЛ-60 призначений для оперативного дистанційного аналізу характеристик атмосферного аерозолі і хмарних утворень в атмосфері за допомогою лазера, що працює на довжинах хвиль 1064нм (інфрачервоний), 532нм (зелений) і 355нм (ультрафіолетовий).



Рисунок 1.8 – Лідарний комплекс МВЛ-60

Приймальна антена лідара є телескоп, найчастіше дзеркальний, побудований зазвичай за схемою Ньютона або Касегрена. У телескопі лідара МВЛ-60 з діаметром головного параболічного дзеркала 60 см реалізовані обидві ці схеми.

При роботі в якості приймальної антени лідара в телескопі реалізується схема Касегрена, коли прийнятий відбитий сигнал лазера потрапляє спочатку на головне параболічне дзеркало, потім на вторинне гіперболічне дзеркало, а далі через отвір в центрі параболічного дзеркала в блок аналізатора, де потім розподіляється на різні фотоприймачі і реєструється комп'ютером.

При роботі в якості звичайного астрономічного приладу в телескопі реалізується схема Ньютона: на оптичній вісі головного параболічного дзеркала розміщуються плоске дзеркало, за допомогою якого прийняте головним дзеркалом зображення виводиться під кутом 90 град. від вісі телескопа. У цьому фокусі об'єктива Ньютона розміщують окуляр або відеокамеру для отримання зображення об'єктів зоряного неба.

#### 1.5.2.2 Багатохвильовий лідар з раманівськими каналами (рис. 1.9) [20]



Рисунок 1.9 – Багатохвильовий лідар з раманівськими каналами

Основними характеристиками лідару є наступні:

- випромінювач 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;
- телескоп (діаметр) Кассегрен, 300 мм первинне дзеркало;
- кут прийому випромінювання 0.6 - 5 мрад;
- довжини хвиль пружного розсіювання 1064 нм;
- раманівські довжини хвиль 387, 407, 607 нм.

### 1.5.3 Об'єктив Грегорі

Дана схема була винайдена Джеймсом Грегорі в 1663 році. В системі Грегорі випромінювання від головного увігнутого параболічного дзеркала направляється на невелике увігнуте еліпсоїдальне дзеркало, яке відображає пучок в фотоприймальний пристрій, поміщений в центральному отворі головного дзеркала. Наявність вторинного дзеркала подовжує фокусну відстань і тим самим дає можливість застосовувати великі збільшення (рис. 1.10) [20].

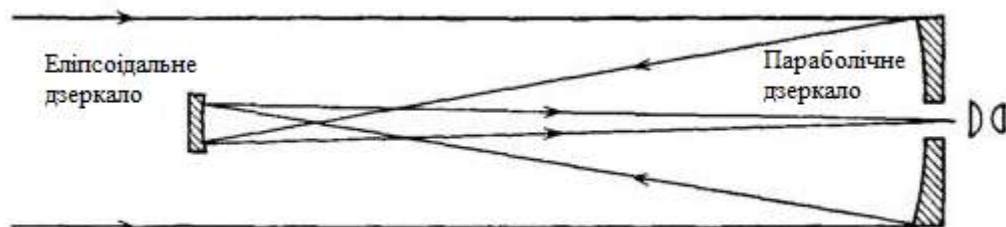


Рисунок 1.10 – Типова структурана схема об'єктиву Грегорі

Принципова відмінність схем Грегорі і Касегрена в тому, що в схемі Грегорі є проміжне дійсне зображення, що, зокрема, дозволяє встановлюючи допоміжну діафрагму, усунути «паразитні» промені, немінучі в схемі Касегрена.

Розмір приймального телескопа, побудованого за схемою Грегорі, виходить менше, ніж телескоп Ньютона, але майже вдвічі більше, ніж об'єктив Касегрена, що збільшує екранування світла вторинним дзеркалом, ускладнює його користування, транспортування і експлуатацію в цілому.

Дана схема не отримала такого поширення, як схеми Ньютона і Касегрена, так як при інших рівних параметрах її недоліки більш істотні, і використовується лише в деяких специфічних випадках.

## 1.6 Методи вимірювання відстані до об'єкту

Лазерні далекоміри за принципом роботи можна розділити на три основні типи:

### 1.6.1 Триангуляційний

Далекоміри цього типу визначають відстань, використовуючи закони геометрії. Далекмір вимірює кут між променем лазера і відбитим променем світла, що потрапили на фотоприймач, і з величини цього кута і відстані між лазером і фотоприймачем обчислює поточну відстань до об'єкта.

У цих далекомірів є переваги:

- найбільш прості серед всіх інших далекомірів;
- можуть вимірювати відстані з високою точністю на близьких дистанціях;
- можуть вимірювати відстані з досить високою швидкістю - до 10 кГц.

Але є і недоліки:

- точність вимірювання відстані значно падає з ростом відстані;

- лазер повинен бути включений досить довго (фотоприймачі мають обмежену чутливість), тому його потужність потрібно обмежувати для безпеки;
- чим менше габарити далекоміра, тим гірше точність вимірювання відстані.

### 1.6.2 Фазовий

У цих далекомірах світло лазера модулюється високочастотним сигналом. Затримка під час поширення променя в його «польоті» до об'єкта і назад призводить до появи фазового зсуву між сигналом, який використовується для управління лазером, і який приймається від об'єкта.

У цих далекомірів є переваги:

- висока точність вимірювання відстані (одиниці міліметрів і менше);
- можна зробити малогабаритний пристрій.

Але є і недоліки:

- лазер працює постійно, тому доводиться обмежувати його потужність. Це призводить до того, що на великих відстанях сигнал, що приймається виявляється досить низьким, що позначається на точності далекоміра;
- електроніка такого далекоміра складна;
- складно отримати високу швидкість вимірювань.

Далекоміри такого типу використовуються в промисловості, геодезії. Лазерні рулетки в більшості своїй використовують як раз фазовий метод вимірювання відстані. Спеціалізовані 3D-сенсори (range imaging camera) теж часто використовують цей метод

### 1.6.3 Імпульсний

Також його називають «часопролітним», Time-Of-Flight (TOF) і, зазвичай, саме він застосовується при лідарних дослідженнях атмосфери. При цьому використовується «класичний», найбільш відомий більшості метод вимірювання відстані - далекомір вимірює тривалість часу розповсюдження світлового імпульсу лазера до об'єкта і назад. Незважаючи на здавалося б простоту методу, через високу швидкість світла досить складно зробити далекомір, здатний з високою точністю вимірювати відстань. Однак для атмосферних лідарів це не є пе-

решкою, оскільки точність вимірювання порядку сотень метрів є для них цілком достатньою.

У такого способу вимірювання відстані є наступні переваги:

- лазер використовується в імпульсному режимі, що дозволяє формувати імпульси надвеликої потужності (більш МВт), що збільшує відношення сигнал/завада на приймальному пристрої лідару. За рахунок цього можна вимірювати дуже великі відстані (навіть до Місяця);

- можна отримати дуже високу швидкість вимірювань – 100 кГц і більше.

Але є і недоліки:

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

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

тому для роздільної здатності порядку 1м необхідна тривалість лазерного імпульсу менш ніж 1нс, що значно обмежує можливі варіанти лазерних випромінювачів;

- електроніка такого далекоміра достатньо складна.

Лідари такого типу активно використовують не тільки для атмосферних досліджень, а також в геодезії, дистанційному зондуванні Землі, промисловості, автономних автомобілях, їх встановлюють на безпілотники – тобто вони зустрічаються всюди, де потрібно вимірювання великих відстаней з помірною точністю.

### 1.7 Відмінності побудови лідарів для моніторингу атмосфери

Базова ідея такого лідара проста: передавач випускає лазерні промені в різних напрямках, і чекає, поки їх відображення повернуться. Швидкість світла відома, і час у дорозі туди і назад дає точну оцінку відстані. І хоча базова ідея

проста, деталі ускладнюють все дуже швидко. Кожен виробник лідарів повинен прийняти три базових рішення: як направляти лазер в різні боки, як вимірювати час на шлях туди і назад, і світло якої частоти використовувати.

Відмінності лідарів можуть бути розглянуті за наступними критеріями:

#### 1) За технологією управлінням променем

- лідар кругового огляду. Компанія Velodyne створила сучасну лідарну систему в 2007 [21], представивши лідар, в якому було розміщено 64 лазера по вертикалі, і вся це оберталася зі швидкістю в кілька оборотів в секунду. Переваги такого підходу - покриття на 360 градусів, але недоліком такого підходу є складність та дорожнеча.

- механічний скануючий лідар використовує додаткове плоске дзеркало, яке перенаправляє єдиний лазерний промінь та вісь приймального телескопу в різних напрямках. Перевагою такого способу є відносна простота реалізації, а недоліком – необхідність застосування додаткового скануючого дзеркала, розміри якого можуть в декілька разів перевищувати розміри головного дзеркала приймального телескопу;

- активна фазована антенна решітка, що використовує ряд випромінювачів, здатних змінювати напрямок лазерного променя, підлаштовуючи відносну фазу сигналу між сусідніми передавачами. Недоліком такого способу є складність реалізації та дорожнеча, а перевагою – велика швидкість сканування повітряного простору;

- лідар на основі випромінювання, що підсвічує всю область спостереження одночасно. Існуючі технології використовують один ширококутний лазер. Технологія зазнає труднощів з великими відстанями, оскільки до будь-якої точки доходить лише мала частина лазерного світла.

#### 2) За способом вимірювання відстані

Лідар вимірює час, який потрібний світлу для того, щоб дійти до об'єкта, і відбитися від нього. Є три простих способи зробити це:

- вимірювання часу розповсюдження світла від лідару до об'єкту і назад. Лідар відправляє короткий імпульс і вимірює, скільки часу пройде до фіксації моменту повертання імпульсу;

- лідар безперервного випромінювання з частотною модуляцією (БВЧМ). Відправляє безперервний промінь світла, частота якого постійно змінюється в часі. Промінь розбивається на два, і один з них відправляється в атмосферу, а потім по поверненню об'єднується з іншим. Оскільки частота у джерела променя змінюється безперервно, різниця в шляху двох променів виражається через різницю їх частот. В результаті виходить картина інтерференції, частота биття якої є функцією від часу розповсюдження світлового імпульсу (і, отже, від відстані). Цей спосіб може здатися безпричинно ускладненим, але у нього є переваги. Лідар БВЧМ стійкий до інтерференції від інших лідарів або від Сонця. Лідар БВЧМ може також використовувати доплерівське зміщення для вимірювання швидкості об'єктів, а не тільки відстані до них;

- лідар безперервного випромінювання з амплітудною модуляцією (Ніамей) можна розглядати, як компроміс між двома попередніми варіантами. Такий лідар, як і простий датчик, що вимірює час розповсюдження, відправляє сигнал, а потім вимірює час, витрачений на те, щоб відбитися і повернутися. Але якщо прості системи відправляють один імпульс, лідар Ніамей відправляє складну схему (псевдовипадковий потік цифрових нулів і одиниць). Завдяки цьому лідар Ніамей більш стійкий до інтерференції.

### 3) За довжиною хвилі лазера

- лідари, що використовують різні варіанти лазерних випромінювачів з фіксованими довжинами хвиль. Це, як правило твердотільні або напівпровідникові лазери, перелік яких достатньо широкий, як за потужністю, так і за довжинами хвиль випромінювання і це є перевагою. Недоліком таких лідарів є обмежена сфера застосування їх для атмосферних досліджень.

- лідари, у яких випромінювачі передавачів здатні плавно перестроювати довжину хвилі випромінювання. У такому разі сфера застосування їх є практи-

чно необмеженою. Однак для реалізації передавача такого лідару необхідно мати інструменти звуження смуги довжин хвиль, а також засоби високоточного контролю довжин хвиль, що значно ускладнює і підвищує вартість лідару в цілому.

#### Висновки до розділу:

- лідар є одним з найбільш перспективних інструментів, здатних дистанційно і безконтактно проводити вимірювання параметрів та складових атмосфери. За весь період створення, розвиток лідарних систем відбувався послідовно від стаціонарних до мобільних наземних, потім до авіаційних, морських і далі до космічних. Це дозволило відпрацювати і оптимізувати схемні і конструктивні рішення, як окремих складових частин, так і лідарної системи заданого призначення в цілому;

- висока чутливість виявлення домішок атмосфери, можливість отримання висотного розподілу їх концентрації та висока просторова роздільна здатність роблять лідари унікальним інструментом для дослідження атмосфери;

- найбільш прийнятним і розповсюдженим способом виміру відстані до об'єкту є імпульсний, суть якого полягає у визначенні часу розповсюдження світлового імпульсу;

- найбільш привабливим варіантом лідару кругового моніторингу атмосфери є застосування додаткового поворотного дзеркала.

## 2 МЕТОДИ ЛІДАРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АТМОСФЕРИ ТА ЛІДАРНЕ РІВНЯННЯ

З точки зору квантово-механічних уявлень про взаємодію електромагнітного випромінювання з речовиною фотон (квант) може брати участь в декількох процесах, а саме: поглинання, спонтанне випромінювання та вимушене випромінювання. Останнє важливо для усвідомлення принципів дії лазерів. Однак з точки зору лідарних досліджень атмосфери найбільше мають значення процеси поглинання та спонтанного випромінювання. Тому всі методи лідарних досліджень тим або іншим чином пов'язані з цими двома ефектами.

### 2.1 Методи лідарних досліджень атмосфери

#### 2.1.1 Метод диференційного поглинання (ДП)

Якщо фотон повністю передає свою енергію атому або молекулі, а сам зникає – це квантово-механічний опис процесу поглинання. Ефект поглинання полягає в тому, що при взаємодії випромінювання з речовиною частина енергії випромінювання поглинається атомом або молекулою і перекладається в іншу форму, наприклад, в тепло. При цьому кожна молекула має унікальний спектр поглинання. Спектр поглинання може бути отриманий у вигляді спектра пропускання, спектра відбиття, спектра послаблення сигналу зворотного розсіювання або спектру втрат в резонаторі і т.д. Ідентифікація спектра поглинання дозволяє розпізнати речовину.

Для реалізації цього методу випромінювач лідару має бути двохвильовим: одна частина випромінювання має бути настроюваною на довжину хвилі спектру поглинення домішки, концентрація якої досліджується, друга – трохи відстроєна в неї. При цьому випромінювач та приймач знаходяться на відстані один від одного. Інформація про концентрацію домішки міститься в різниці послаблення випромінювання на трасі для двох довжин хвиль. Основною перева-

гою метода є відносна простота реалізації, а до недоліків слід віднести неможливість виміру розподілу концентрації домішки уздовж траси.

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

Диференціальне поглинання і розсіяння (ДПР), як і попередній ДП, в основному, застосовується для контролю або вимірювання концентрацій одного або декількох ранише обраних газів, або домішок атмосфери. Для нього також потрібний двохвильовий випромінювач, з точним настроюванням одного з променів на довжину хвилі спектру досліджуваної домішки. Однак у цьому методі використовується також розсіяне молекулами атмосфери випромінювання, яке по суті є носієм інформації. Для методу ДПР не потрібно рознесення передавача та приймача один від одного, що є перевагою даного методу порівняно з попереднім. Крім того, метод ДПР також дозволяє отримати просторовий розподіл концентрації домішок уздовж траси. До недоліків слід віднести деяке ускладнення порівняно з попереднім апаратури та алгоритму обробки результатів вимірювань, а також зменшена чутливість виявлення домішок.

### 2.1.3 Метод аерозольного розсіювання

Аерозольне розсіювання – класичне пружне розсіяння, що відбувається на довжині хвилі падаючого випромінювання, коли розміри розсіяних часток дорівнюють або більше довжини хвилі оптичного випромінювання. При цьому розсіяне світло сконцентрований в основному в напрямку "вперед" і має значно меншу інтенсивність в напрямку "назад".

З точки зору квантово-механічних уявлень, процес пружного розсіювання являє собою взаємодію фотона світла з речовиною, при якому відбувається миттєве відбиття фотона атомом чи молекулою без процесу поглинання.

Кількісною мірою будь-якого процесу розсіювання електромагнітної енергії є, так званий, коефіцієнт розсіювання, що визначається формулою:

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

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

Коефіцієнт розсіювання однією частинкою атмосфери (атомом, молекулою, аерозольною частинкою і т.ін.) має розмірність площини та назву перетину розсіювання і визначається формулою:

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

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

Таким чином, перетин розсіювання можна трактувати, як ефективну площу взаємодії електромагнітного випромінювання з частинкою повітря.

Хоча перетин цього виду розсіювання достатньо великий, що забезпечує високу чутливість при зондуванні зважених в повітрі частинок, таких як пил, водяні краплі, ефект аерозольного розсіювання не дозволяє проводити аналіз атомного і молекулярного складу атмосфери.

Суттєвим є те, що для реалізації цього методу перестроювання довжини хвилі випромінювання не потрібно, тому можливо використання будь-якого лазера з фіксованою довжиною хвилі та достатньою енергією в імпульсі.

#### 2.1.4 Метод Релеєвського розсіювання

Релеєвське розсіювання це також різновид пружного розсіювання, яке відбувається від молекул повітря. Розсіювання також, як і в випадку аерозольного, відбувається без зміни енергії молекул, з якою взаємодіє фотон світла.

Особливістю цього виду розсіювання є те, що його інтенсивність обернено пропорційно четвертій ступені довжини хвилі, тобто  $\beta_m \propto \lambda^{-4}$ . Це дозволяє виділити окремо аерозольну та молекулярну складову атмосфери.

Релеєвське розсіювання використовується для дослідження турбулентності атмосфери, флуктуації щільності в дифузійних пламенах і визначення видів молекул в турбулентному потоці.

### 2.1.5 Метод спонтанного комбінаційного розсіювання (СКР)

Якщо світловий потік є монохроматичним, що притаманне лазерним джерелам, то при уважному дослідженні спектру розсіяного молекулами випромінювання можливо помітити спектральні бічні складові, які відсутні в первинному випромінювання. Це пояснюється тим, що у такому разі має місце непружне розсіювання зі зміною енергії молекули, тобто молекула поглинає енергію фотона і далі перевипромінює світло на бічних довжинах хвиль, відстань яких від первинного випромінювання залежить від структури молекули (зсув Стокса). Таким чином, вимірюючи інтервал довжин хвиль між первинним і комбінаційно розсіяним випромінюванням, можливо однозначно ідентифікувати молекулярну компоненту атмосфери, тобто метод є універсальним для отримання інформації про будь-яку атмосферну речовину. Інформація про концентрацію молекул міститься в інтенсивності розсіяного випромінювання.

Перетин комбінаційного розсіювання приблизно на три порядки менший за молекулярного, а залежність його від довжини хвилі така ж сама. Тому при зондуванні атмосфери доцільніше використовувати лазери з меншими довжинами хвиль.

Незважаючи на очевидні переваги методу СКР, його реалізація досить складна. По-перше, необхідно на декілька порядків зменшити у розсіяному випромінювання спектральну складову первинного випромінювання, яка обумовлена пружним аерозольним та молекулярним розсіюванням. По-друге, потужність лазера має бути порівняно великою, щоб мати на вході приймальної системи достатній рівень відношення сигнал/завада, оскільки перетин комбінаційного розсіювання є дуже малим. По-третє, точне вимірювання спектральних складових сигналу супроводжується ускладненням спектрального аналізатору.

Ефект СКР не селективний і не вимагає використання спеціальних джерел випромінювання. Інтенсивність ліній СКР пропорційна концентрації молекул в зондуєчому обсязі, що дозволяє отримувати кількісну інформацію про об'єкт дослідження[7].

Методи лазерного зондування з використанням СКР дуже перспективні, тому що дають можливість проводити ідентифікацію і контроль атмосферних складових з одного пункту, а при використанні нерезонансного СКР сам ефект не залежить від довжини хвилі падаючого випромінювання. Інтенсивність ліній СКР пропорційна числу молекул в початкових станах, переходи з яких породжують цю лінію або смугу, КР використовується не тільки для отримання інформації про молекулярну структуру, але і для вимірювань щільності, температури і концентрації забруднень в повітрі.

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

Резонансне спонтанне комбінаційне розсіювання (РСКР) є різновидом СКР і спостерігається, коли частота збуджуючого первинного випромінювання близька з однією з частот електронного переходу молекули. При цьому має місце суттєве (на три-чотири порядки) збільшення перетину комбінаційного розсіювання. При використанні джерел випромінювання в УФ діапазоні довжин хвиль збільшується ймовірність появи РСКР.

Збільшення перетину від трьох до шести порядків величини в порівнянні з перетином звичайного КР на молекулах  $N_2$  спостерігалось при переході до резонансу для таких молекул, як  $I_2$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ . Це дозволяє дистанційно виявляти досить низькі концентрації атмосферних складових, якщо поглинання не призведе до значного ослаблення зондувального випромінювання.

Перевагою методу є значне перевищення відношення сигнал/завада порівняно з СКР методом. До недоліків, в першу чергу, слід віднести необхідність застосування лазера, здатного до перестроювання частоти, та ще й в ультрафіолетовому діапазоні, що значно звужує межі використання цього методу на практиці.

### 2.1.7 Метод резонансного розсіювання

Якщо частота енергетичного переходу в спектрі атома збігається з частотою випромінюваного лазером фотона, то атоми поглинають випромінювання і переходять у збуджений стан, середньостатистична тривалість життя якого дуже мала ( $\sim 10^{-9}$ с), тому атом повертається в первинний стан із випромінюванням фотона на тій же самій довжині хвилі. Це явище прийнято називати резонансним розсіюванням, або атомною флуоресценцією. Резонансне розсіювання є ізотропним.

Для резонансного розсіювання величина перетину є суттєвою більшою (на кілька порядків), ніж молекулярного. Наприклад у випадку атомів натрію різниця в перетинах сягає 14 порядків.

Однак практична реалізація цього явища обмежена тією обставиною, що в нижній атмосфері середній час пробігу молекул до зіткнення менше середньостатистичної тривалості життя збудженого атома. В зв'язку з цим збуджені атоми не встигають перевипромінювати фотон світла, а надлишок енергії атома переходить у кінетичну енергію при зіткненні з молекулою воздуха. Це явище називається тушінням флуоресценції. Розрахунки свідчать про ефективне використання цього методу лише для висот більше ніж 50км.

Унікальною особливістю резонансного методу є його надзвичайно висока чутливість завдяки дуже великому перетину розсіювання. За допомогою резонансного лідару виявилось можливим вимірювання концентрації лужних металів метеорного походження до одного атома у кубічному сантиметрі на висотах близько 100 км.

Для реалізації методу необхідно застосування вузькосмугового лазера, здатного до перестроювання довжини хвилі, а також досить складної системи контролю спектральних параметрів випромінювання.

На закінчення відмітимо велику потенційну перспективність методу резонансного розсіювання для вирішення багатьох задач фізики верхньої атмосфери, зокрема, таких, як дослідження фотохімічних реакцій, концентрації газів, іонізованих компонент атмосфери і т. ін.

### 2.1.8 Молекулярна резонансна флуоресценція

Флуоресценція є спонтанне випускнення фотона молекулою в процесі релаксації після переходу її у збуджений стан. Поглинене випромінювання переводить молекулу в будь-який із можливих збуджених електронних станів. Далі за рахунок взаємодії з навколишнім середовищем, надлишок енергії швидко витрачається, переводячи молекулу на найнижчий коливальний підрівень станів  $S_1$ . Цей процес називається коливальною релаксацією. У результаті коливальної релаксації, перехід молекули з випромінюванням в більшості випадків здійснюється вже безпосередньо з самого нижнього коливального підрівня стану  $S_1$  на різні коливальні підрівні основного стану. Тому спектр випускання відображає коливальну структуру основного електронного стану. Для багатоатомних молекул цей процес призводить до широкосмугової флуоресценції, що має квазінеперервний спектр, за рахунок перекриття смуг. Для ефекту флуоресценції характерна висока ефективність взаємодії. Саме тому, методи виявлення, засновані на ефекті флуоресценції, мають особливо високу чутливість, залишаючись при цьому дистанційними. Проте, не дивлячись на досить високу чутливість цих методів, вони не дозволяють проводити ідентифікацію речовин через збіг спектрів випускання багатьох органічних сполук. Застосування молекулярної флуоресценції призводить до того, що загасання збудження молекул також надає шкідливий вплив, що приводить до зменшення реєстрованого сигналу. Широкосмугова природа молекулярної флуоресценції є причиною низького значення відношення сигналу до шуму; при цьому основний внесок в шум дає фонове випромінювання. Зростання тривалості флуоресценції призводить до погіршення просторового дозволу[7].

Процес резонансної флуоресценції полягає в тому, що, частота падаючого на атом світла збігається з однією з власних частот атома, тому виникає резонанс і атомні електрони розгойдуються падаючим світлом більш сильніше, ніж «удалині» від резонансу. Відповідно інтенсивність розсіяного світла різко збільшується (рис. 2.1) [9]. Це явище було виявлено в 1905 р знаменитим аме-

риканським експериментатором Робертом Вудом і стало називатися резонансною флуоресценцією.

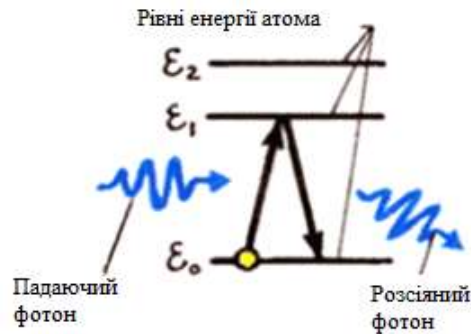


Рисунок 2.1 – Явище резонансної флуоресценції

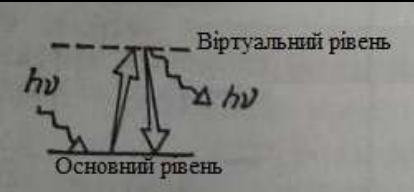
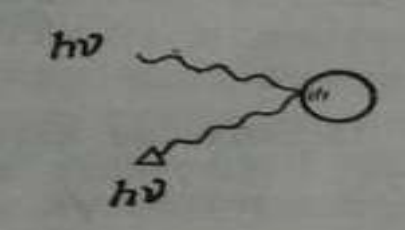
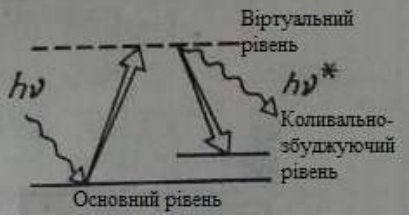


З квантової точки зору для атомного резонансу необхідно, щоб енергія падаючого фотона збіглася з енергією одного з рівнів атома. Молекули і атоми повітря знаходяться в хаотичному тепловому русі, а аерозолі, важчі частинки, переносить вітер. Згадаймо ще одне фізичне явище – ефект Доплера. В акустиці цей ефект проявляється як зміна частоти звукових коливань, які реєструє спостерігач при наближенні або віддаленні джерела звуку. Явище Доплера характерно і для електромагнітних хвиль. Фотони, які впали на молекули і розсіялися, змінюють частоту. Так як хаотичний рух молекул відбувається з різними швидкостями і в усіх напрямках, в розсіяному випромінюванні спостерігається цілий спектр частот – відбувається доплеровське розширення лінії випромінювання лазера. Таке явище вже використовувалася, наприклад, для визначення температури верхніх шарів атмосфери по лініях випромінювання полярних сьйв. А аерозолі відчувають спрямований рух – виникає доплеровське зрушення частоти. Цей ефект використовується, зокрема, астрофізиками для визначення швидкості галактик, що розлітаються. Інтенсивність процесу поглинання знаходять за величиною поперечного перетину поглинання однією молекулою, а добуток цієї величини на число молекул в одиниці об'єму є показник поглинання даного середовища. Аналогічно ефективність розсіювання визначається величиною показника розсіювання. Сума показників поглинання і розсіювання є показник



ослаблення середовищем даного випромінювання; 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, що використовуються в лазерному дистанційному зондуванні

Метод	Фізичний опис	Ілюстрація
Релеєвське розсіювання	Лазерне випромінювання, пружньо розсіюване атомами та молекулами, спостерігається на початковій частоті	
Розсіювання Мі	Лазерне випромінювання, пружньо розсіюване малими частинами (розмір яких зрівнюється з довжиною хвилі випромінювання), спостерігається на початковій частоті	
Комбінаційне розсіювання	Лазерне випромінювання, розсіюване молекулами, спостерігається з деяким частотним зсувом, що характеризує дані молекули ( $h\nu - h\nu^* = E$ )	
Резонансне розсіювання	Лазерне випромінювання на частоті певного переходу в атомі розсіювання на початковій частоті	
Флуоресценція	Лазерне випромінювання на частоті певного електронного переходу в атомі або молекулі зазнає поглинання з наступним випромінюванням на більш низькій частоті; зіткнення гасіння може зменшити	

	ефективний перетин цього процесу; в молекулах спостерігається широкополосне випромінювання	
Поглинання	Ослаблення лазерного пучка спостерігається, якщо частота випромінювання потрапляє в полосу поглинання цієї молекули	
Диференційне поглинання і розсіювання	Диференційне ослаблення двох лазерних пучків визначається по їх сигналах зворотного розсіювання; при цьому частота випромінювання в одному з пучків налаштовується близько до частоти цього молекулярного переходу, в той час як частота другого – декілька остронь від частоти переходу	

На рисунку 2.2 [1] зображено діапазони перетину розсіювання кожного з процесів. Спостерігаємо, що перетини аерозольного розсіювання ( $M_i$ ) можуть бути настільки великими, що навіть незначна кількість розсіюваних частинок відповідних розмірів може дати сигнал розсіяного випромінювання, що повністю перекриває сигнали обумовлені релеевським або комбінаційним розсіюванням. Звідси, за допомогою лазера можливо зареєструвати значно малі концентрації частинки пилу або аерозолію.

Хоча резонансне розсіювання називається інколи атомною або резонансною флуоресценцією, також має великий перетин, гасіння при зіткненнях з більш розповсюдженими складовими атмосфери зазвичай приводить до слабкого сигналу: внаслідок цього найбільш ефективно метод можна використовувати при дослідженні малих складових верхньої атмосфери. У випадку молекулярної флуоресценції гасіння за рахунок зіткнення молекул може здійснювати негативну дію, навіть коли є тривалі стани збудження. Широкополосне середовище молекулярної флуоресценції є причиною низького значення відношення сиг-

нал/шум. При цьому основним внеском до шуму є фонове випромінювання. З ростом тривалості флуоресценції може падати просторовий дозвіл.

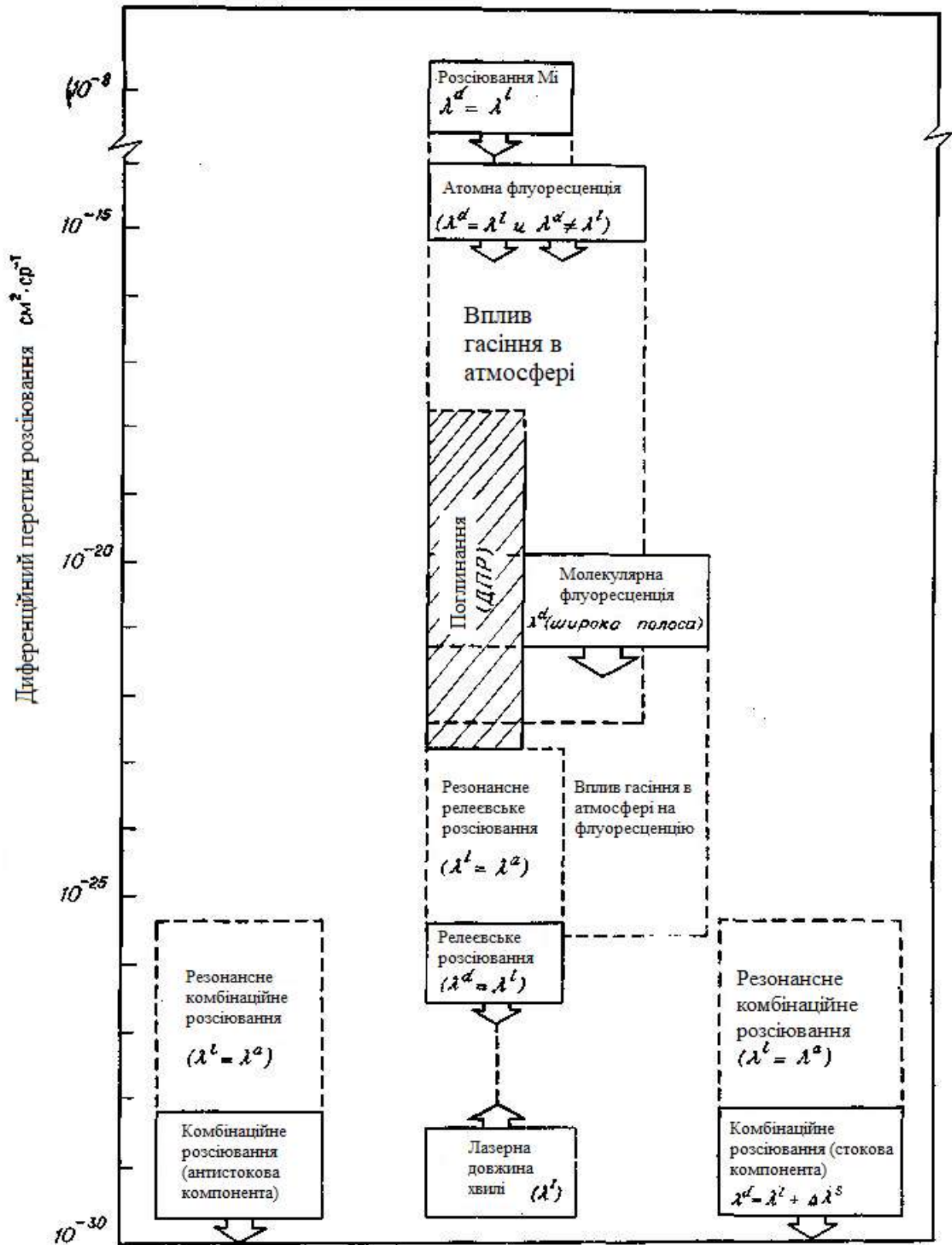


Рисунок 2.2 – Типи оптичної взаємодії, які використовуються в лазерному зондуванні

## 2.2 Лідарне рівняння

Основні принципи лазерного зондування можуть бути виражені лідарним рівнянням в наближенні однократного розсіювання [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.

Оскільки імпульс, що посиляється в атмосферу, має кінцеву тривалість  $\tau$ , він висвітлює в кожен момент обсяг атмосфери з кінцевої довжиною  $c\tau$ . Однак через те, що посиляється імпульс повинен пройти подвійний шлях, довжина обсягу атмосфери (крок за дальністю), з якого приймається сигнал в якийсь момент часу  $t$ , так само тільки половині цієї величині. Щоб уявити це кількісно, припустимо, що передній край (початок) імпульсу випускається в момент часу  $t_0$ . Тоді максимальна відстань, з якого випромінювання приймається в момент  $t$ , визначається половиною дистанції, яку передній край імпульсу пройшов би за цей проміжок часу. Значить:

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

В цей же самий момент  $t$  надходить додатково енергія з ділянок, освітлюваних частинами імпульсу, випущених після його початку. Оскільки задній

край (кінець) імпульсу був виданий в момент  $t_0 + \tau$ , то мінімальна відстань, з якого в момент часу  $t$  приймається випромінювання, визначиться виразом:

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

Таким чином, відстань обумовлена ефективною довжиною імпульсу  $\tau$ , так званий інтервал дальності, або вирішувальна просторова спроможність дорівнює:

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

Вона в точності дорівнює половині дійсної довжини миттєво освітлюваним імпульсом обсягу через подвоєну довжиною шляху, який все прийняте випромінювання має пройти.

Об'ємний коефіцієнт розсіювання назад  $\beta$  визначається як частка падаючої енергії, розсіяна в одиничному тілесному куті (стерадіан) у напрямленні назад ділянкою атмосфери одиничної довжини. Оскільки розглядалося пружне розсіювання (для яких падаюче і прийняте випромінювання мають одну і ту ж довжину хвилі). Символ  $\beta$  надалі буде використовуватися для позначення компонента об'ємного коефіцієнта пружного розсіювання в напрямку назад.

Ефективна площа приймача входить в рівняння через те, що вона визначає тілесний кут, під яким приймач видно з відстані  $R$  (за умови, що кут розходження посилається пучка не перевищує кут прийому і вся випущених енергія вносить вклад в розсіювання назад з відстані  $R$ ).

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

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

Вона залежить від  $\alpha$  - об'ємного коефіцієнта ослаблення атмосфери, який показує, у скільки разів зменшується потік випромінювання на одиничному шляху в напрямку поширення. Цей коефіцієнт застосовується в такому простому вигляді, якщо справедливий закон Бугера, тобто коли практично вся розсіяна енергія постійно віддаляється з лазерного пучка. Таке спрощення зазвичай прийнятно для дуже прозорої атмосфери. У сильно розсіюваній атмосфері, наприклад в хмарі, тумані або в щільну серпанку, частка розсіяного випромінювання, яка залишається або надходить знову в пучок, може стати значною. В цьому випадку слід зробити поправку на багаторазове розсіювання в рівнянні одноразового розсіювання.

Оскільки розміри газових молекул дуже малі в порівнянні з довжинами хвиль лазерного випромінювання, пружне розсіяння в напрямку назад на молекулах атмосферних газів описується (за винятком ліній поглинання) наближенням релєївського 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 релєївської відстані під кутом  $\theta = \pi$  в розрахунок на 1 середню молекулу газу.

Для суміші атмосферних газів, які на висотах до 100 км:

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

Потужність лідарного сигналу від резонансного розсіювання на висоті  $z$  може бути описано наступним чином:

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

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

$P_0 = Ec/2$  – вихідна потужність,

$E$  – 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 викликається практично тільки наявністю атомів домішки. Розсіюванням від аерозолів або молекул на подібних висотах можна знехтувати, так як воно дуже мало, і сфокусувати увагу лише на сигналі резонансної флуоресценції.

### 2.3 Лідарна апаратура і методика резонансного зондування домішок

Загальний принцип лідарного зондування атмосфери аналогічний принципу радіолокації з тією лише різницею, що замість радіохвиль використовується електромагнітне випромінювання у видимому діапазоні. Лазерне випромінювання частково поглинається і розсіюється атмосферними компонентами. Частина розсіяного назад випромінювання потрапляє на приймальню систему, що забезпечує висотну реєстрацію сигналу. Основні механізми розсіювання лазерного випромінювання атмосферою, що використовуються при висотному

зондуванні – це молекулярне, аерозольне (Mi) і резонансне. Ефект молекулярного або релеевського розсіювання (ефективний переріз розсіювання назад  $\sigma_M^\pi \sim 10^{-28} \text{ см}^2 \sim \lambda^{-4}$ ) лежить в основі роботи релеевського лідара, що забезпечує отримання вертикального профілю щільності і відповідно температури атмосфери [4].

Аерозольне або Mi-розсіювання використовується для реєстрації профілю атмосферного аерозолі на висотах 10 ..30 км. Резонансне розсіювання для деяких атмосферних компонентів досить ефективно. Метод резонансного розсіювання знайшов широке застосування для реєстрації висотних профілів лужних металів (Na, K, Li), що знаходяться в природному стані на висотах 80 ... 100 км. Особливо розвинена техніка лідарних спостережень мезосферного натрію. Структурна схема типової резонансної лідарної системи представлена на рис. 2.3 [6].

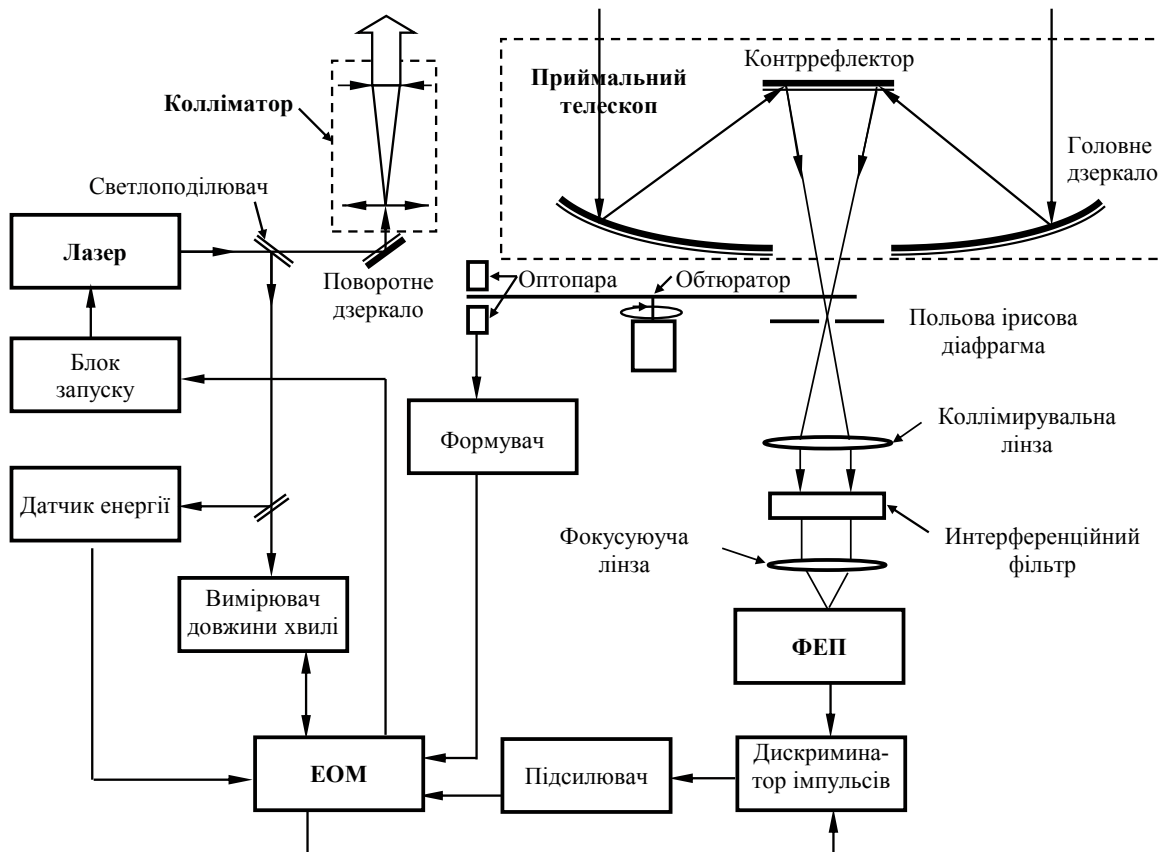


Рисунок 2.3 – Структурна схема типової резонансної лідарної системи

При зондуванні атмосфери, передавач налаштовується на резонансну лінію поглинання атома. У більшості випадків використовуються лазери на барв-

никах, накачується лампою-спалахом. Невелика частина випромінювання лазера направляється на датчики спектрального контролю і енергії, а також на імпульсний фотодетектор, який синхронізує роботу передавача і приймального пристрою. Імпульс лазерного випромінювання досягає шару мезосферні домішки і переводить атоми в збуджений стан. Час життя атома в збудженому стані значно менше середньостатистичного інтервалу між зіткненнями на цих висотах, тому гасінням флуоресценції можна знехтувати і вважати, що при переході в основний стан практично всі збуджені атоми ізотропно перевипромінюють. Розсіяне назад випромінювання збирається телескопом і фокусується на фотоелектронний помножувач (ФЕП).

Внаслідок дуже низького рівня сигналу ФЕП зазвичай працює в режимі рахунку фотонів. Для придушення фонові засвітки фотоприймача випромінюванням, розсіяним з низьких висот, використовується механічний затвор-обтюратор, що синхронізує включення лазера в момент перекриття ФЕП за допомогою оптопари світлодіод-фотодіод. Польова діафрагма обмежує кут зору приймального телескопа, а інтерференційний фільтр пригнічує більшу частину фонового випромінювання за межами спектра випромінювання лазера. Сигнал ФЕП обробляється імпульсним підсилювачем-дискримінатором, а також лічильником, стробувальний по дальності. На виході імпульсного дискримінатора виходять логічні імпульси, які потім можна вважати за допомогою стандартних швидкодіючих цифрових схем.

Лідарні дані представляють собою серії імпульсів, що відповідають послідовним інтервалам дозволу по дальності. Рівень сигналу від одиничного лазерного імпульсу, як правило, є недостатнім для відновлення профілю концентрації домішки, тому в залежності від необхідної точності вимірювань фотони накопичуються за кількома імпульсам протягом часу, який визначається енергетичними характеристиками лідача [5].

Передавач є ключовим і найбільш складним елементом резонансного лідача. До його характеристик пред'являються дуже жорсткі і, найчастіше, суперечливі вимоги. В якості випромінювачів в резонансних лідачах застосову-

ються як лазери з когерентним накачуванням, так і лазери на барвниках з ламповим накачуванням. При порівнянних значеннях середньої потужності останні мають перевагу в енергії випромінювання в імпульсі.

В оптичних схемах лампових генераторів, як правило, використовується плоскопаралельний резонатор. По-перше, використання плоскопаралельного резонатора забезпечує заповнення модами резонатора всього обсягу активного середовища, що важливо в умовах, коли від генератора потрібна максимальна енергетична ефективність. По-друге, застосування плоскопаралельного резонатора спрощує взаємну юстування вісі приймача і передавача.

Найбільш важливим є спектральний контроль випромінювання, оскільки при резонансному способі зондування дані про спектральні характеристики випромінювання безпосередньо впливають на точність вимірювань. Випромінювання генератора пропускається через резонансний осередок. При збігу довжини хвилі випромінювання з контуром поглинання речовини, спостерігається інтенсивне перевипромінювання, що реєструється фотоприймачем. Інформація про налаштування в цьому випадку міститься в амплітуді імпульсів на виході фотоприймача. Резонансний спосіб контролю досить простий в реалізації і в силу принципу дії має виняткову достовірність. Найбільш істотним його недоліком є відсутність інформації про знак розстроювання, що робить незручним використання резонансних осередків в системах автопідстроювання.

Процес детектування розсіяного випромінювання описується статистикою Пуассона, і похибкою вимірювання може бути оцінена як:

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

де  $N$  - кількість зареєстрованих фотонів.

При вимірі лідарного сигналу системою ця помилка повинна складати не більше 0,5%. Таким чином, з одного висотного шару система повинна реєструвати не менше  $4 \cdot 10^4$  фотонів. Однак реальні сигнали набагато слабші, тому ви-

користується метод накопичення сигналу за певну кількість зондувань. У такому разі 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 до розділу:

- із всього різноманіття методів і систем для зондування і контролю атмосферного середовища найбільш чутливим методом є метод резонансного розсіювання, однак практична реалізація його можлива тільки для висот верхньої атмосфери;

- застосування методу резонансного розсіювання потребує наявності у складі лідару вузькосмугового лазеру, здатного до перестроювання довжини хвилі випромінювання;

- резонансний лідар має містити у своєму складі систему точного настроювання довжини хвилі випромінювання на спектр поглинання речовини, що досліджується.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ТА РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНОГО ЛІДАРУ

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

Для дослідження фотохімічних і динамічних процесів, що відбуваються в верхній мезосфері – нижньої термосфери, вже більше 30 років застосовуються лазерні локаційні системи (лідари), що використовують ефект резонансної флуоресценції на атомах металів і їх іонів, в тому числі натрію, літію, калію, кальцію, заліза, іонів кальцію, магнію барію і ін. Основним джерелом утворення металовмісних шарів в цій області атмосфери вважають абляцію метеорної речовини. Метеорні потоки, вступаючи в атмосферу Землі, забезпечують значну кількість металевих трасерів, стеження за якими дозволяє не тільки отримати відомості про склад метеорної матерії, але і дані про параметри верхньої атмосфери.

Порядок величин поперечних перетинів резонансного розсіювання наочно свідчить про потенційні можливості методу. Використання резонансного розсіювання лазерного випромінювання на атомах і іонах металів є перспективним, перш за все, при спостереженнях метеорної матерії, що надходить в атмосферу Землі. Атоми і іони металів дають основні лінії, що виявлені в спектрах свічення метеорів на висотах 80-130 км. При цьому спектри метеорних потоків, що мають велику геоцентричну швидкість, характеризуються сильними лініями іонів, на відміну від потоків з малої геоцентричною швидкістю.

Найбільша кількість робіт присвячена резонансній флуоресценції натрію, що пояснюється його високим вмістом в атмосфері, великою величиною перетину зворотного розсіювання і наявністю ефективних лазерних джерел випромінювання на довжині хвилі відповідної резонансної довжині хвилі атома. Натрієвий шар, як і інші металомісткі шари, розташований на висотах від 80 до 110км з незначними варіаціями кордонів і був відкритий ще в кінці 20-х років

минулого століття, задовго до появи резонансних лідарів, і спостерігався у резонансному розсіювання сонячної радіації (сутінкове світіння), що дозволяло визначати, головним чином, сезонні варіації загального вмісту атомів в шарі.

Межі натрієвого шару були вперше визначені по ракетним вимірам денного світіння натрію. Поява перестроюваних лазерів дозволило дистанційно досліджувати вертикальну структуру натрієвого шару лідарами, що використовують резонансну флуоресценцію натрію.

Висотний діапазон вимірювань температури (щільності) по молекулярному розсіюванню обмежений: знизу – аерозольним розсіюванням, що порушує пропорційність реєстрованого сигналу і щільності повітря, а зверху – точністю вимірювань самого сигналу, спадної з висотою пропорційно щільності атмосфери і квадрату дальності зондування (висоти).

Останнім часом великий інтерес в дослідженнях викликає використання резонансного лідара в адаптивних оптичних системах. Відомо, що основним обмеженням роздільної здатності астрономічних телескопів є атмосферна турбулентність. Одним із способів компенсації спотворень, пов'язаних з проходженням випромінювання через атмосферу є корекція хвильового фронту за допомогою деформованих або сегментуючих дзеркал, керованих електроприводами. Для функціонування таких систем потрібні яскраві опорні джерела випромінювання поблизу об'єкта, що спостерігається. Варіант випромінювача з когерентної накачуванням малопривабливий, оскільки не забезпечує необхідних великих значень енергії випромінювання в імпульсі. Потужний лазер з перестроюванням довжини хвилі здатний створити в натрієвому шарі природного походження коригувальну зірку достатньої яскравості з тим, щоб забезпечити вихід адаптивного телескопа на дифракційну межу. Для досягнення необхідних рівнів сигналів на вході приймальних пристроїв аналізу хвильового фронту необхідно більш високі енергетичні характеристики передавача.

### 3.2 Особливості побудови резонансного лідару

Найбільшого поширення набула моностатична конфігурація лідару, в якій лазерний пучок передається або уздовж оптичної осі приймального телескопа, або паралельно їй. Просторова роздільна здатність досягається використанням імпульсного лазерного випромінювача і стробуванням приймача по дальності. Базова схема моностатичної лідарної системи на резонансній флуоресценції багато в чому аналогічна схемі лідарів на аерозольному, релеєвському або раманівському (комбінаційному) розсіюванні. На рис. 3.1 [11] представлена структурна схема типового РФН-лідару. Імпульсний лазер налаштовується на резонансну лінію поглинання  $\text{NaD}_2$  на довжині хвилі 589 нм, що лежить в жовто-помаранчевої частини видимого спектру. У більшості існуючих РФН-лідарх використовуються лазери на барвнику з накачуванням лампою-спалахом, а також ексимерні лазери або АІГ: Nd-лазери.

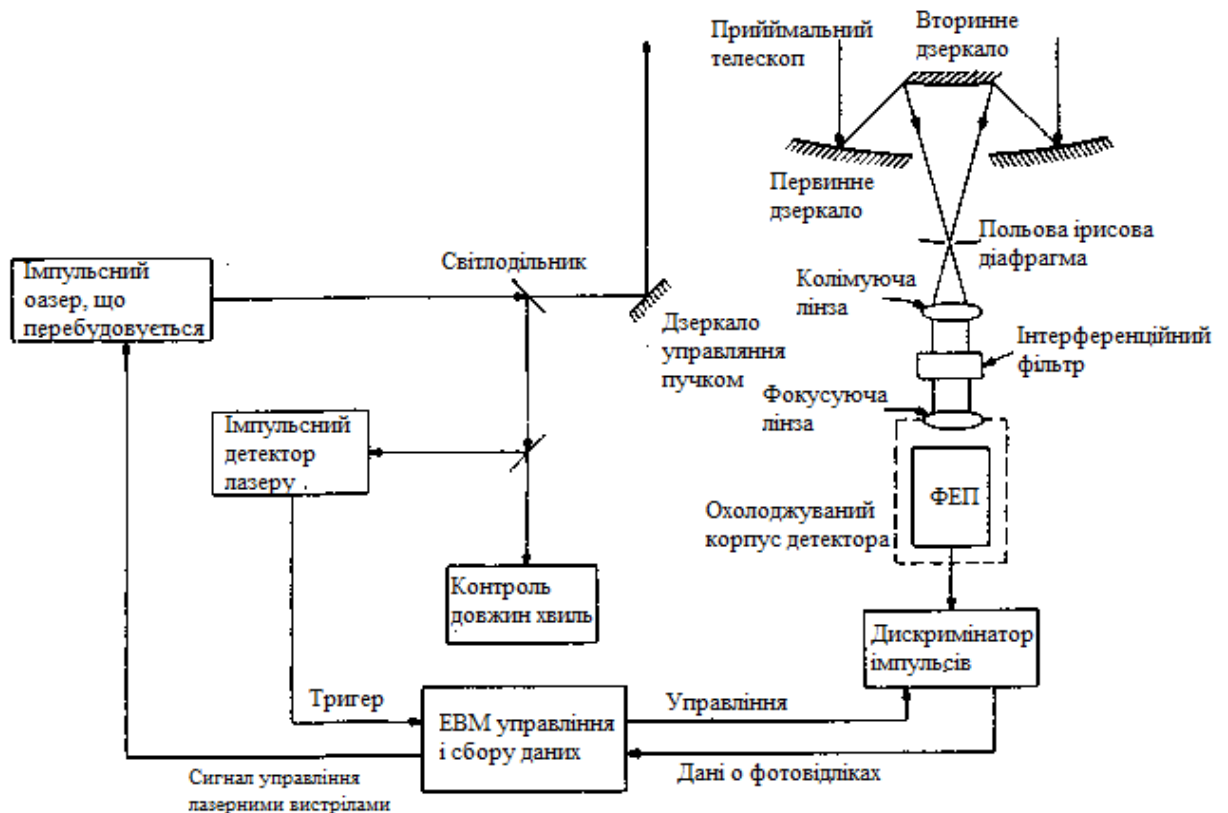


Рисунок 3.1 – Структурна схема типового РФН-лідару

Невелика частка (<1%) вихідного випромінювання лазера направляється на датчики контролю довжини хвилі і енергії, а також на імпульсний детектор, який синхронізується на систему прийому (збору) даних. Імпульс лазерного випромінювання досягає натрієвого шару, де він зазнає резонансне розсіювання на нейтральних атомах Na. Розсіяні назад фотони збираються телескопом і фокусуються на фотоелектронний помножувач (ФЕП). Внаслідок дуже низького рівня розсіяного сигналу ФЕП повинен працювати в режимі рахунку фотонів навіть тоді, коли лідарна система функціонує в денний час доби. Польова (фокальна) ірисова діафрагма і інтерференційний фільтр в приймальному телескопі забезпечують придушення більшої частини фонового світла від зірок, Місяця і Сонця. Сигнал ФЕП обробляється імпульсним дискримінатором, а також лічильником, що стробується по дальності. Імпульсний дискримінатор перетворює слабкі (кілька десятих часток вольт) імпульси ФЕП в логічні імпульси, які потім можна рахувати за допомогою стандартних швидкодіючих цифрових схем. Первинні лідарні дані представляють собою серії відліків фотонів, відповідних послідовним елементам дозволу по дальності. Оскільки сигналу від одиничного лазерного імпульсу недостатньо для відновлення повного профілю концентрації Na, в залежності від необхідної точності вимірювань фотони накопичуються за кількома імпульсам протягом часу від десятків секунд до декількох хвилин.

### 3.3 Аналіз рівняння оптичної локації стосовно резонансного лідару

Характеристики будь-якої лідарної системи визначаються лідарним рівнянням. Для випадку системи на резонансній флуоресценції рівняння лазерної локації записується у вигляді [1]:

$$N(z) = \left( \eta \cdot T_A^2 \right) \cdot \left( \frac{E_0}{h\nu} \right) \cdot \sigma_{ef}(\nu) \cdot n_s(z) \cdot \Delta z \cdot \left( \frac{S_{np}}{4\pi z^2} \right) + N_{ш} \quad (3.1)$$

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

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

$N_{ui}$  – очікуване число фонових або темнових фотовідліків на інтервалі дозволу по дальності за один імпульс;

$\sigma_{ef}(\nu)$  – залежний від частоти ефективний перетин розсіювання на атомах домішки;

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

$S_{np}$  – 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) виведено в припущенні, що ослаблення лазерного променя при розповсюдженні через зондуючий шар дуже малий (оптично тонкий шар) і щільності енергії в пучку в цьому шарі досить малі, з тим щоб можна було знехтувати ефектами індукованого випромінювання збудженими атомами.

Коефіцієнт включає в себе оптичні ефективності світлодіодників, лінз, дзеркал і оптичних фільтрів в передавачі і приймальному телескопі, а також квантовий вихід ФЕП. Другий множник у виразі (3.1) – це число фотонів, що випромінюються лазерним передавачем. Третій множник – перетин розсіювання – характеризує 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. У загальному вигляді ефективне значення перетину розсіювання визначається виразом:

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

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

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

$$\sigma_{ef} = \sigma_{\max} \cdot \frac{\delta\nu_D}{\sqrt{(\delta\nu_D)^2 + (\delta\nu_L)^2}} \quad (3.3)$$

де  $\sigma_{\max}$  – перетин поглинання (розсіювання) 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 зворотньо-розсіюваного 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.

З рівняння локації (3.1) і виразу (3.3) випливає, що інтенсивність приймального сигналу залежить як від енергії передавача, так і від ширини спектра випромінювання. Для звуження смуги частот і перестроювання оптичних генераторів в резонатор встановлюються селективні елементи. При цьому в резонатор неминуче вносяться додаткові втрати. Таким чином прагнення до зменшення ширини спектральної лінії випромінювання буде супроводжуватися зниженням

енергії випромінювання, тобто між основними характеристиками випромінювача  $E_0$  і  $\delta\nu_L$  існує параметричний зв'язок і вони незручні як критерії якості передавального пристрою. Зі сказаного вище впливає необхідність вибору критерію, що універсальним чином враховує спектрально-енергетичні характеристики передавача. Використаємо критерій ефективної енергії випромінювання, що визначається співвідношенням:

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

Очевидно, що ефективна енергія випромінювання буде характеризувати енергію випромінювання лазера, яке потрапляє в спектр поглинання досліджуваної домішки. Величина ефективної випромінюваної енергії може бути обрана в якості основного критерію оцінки ефективності роботи лідару, оскільки згідно (3.1) визначає рівень сигналу. Тому основним завданням при розробці лідару є досягнення максимального значення цієї величини. Завдання може бути вирішене різними способами, однак простий шлях збільшення енергії випромінювання при збереженні широкої спектральної лінії випромінювання є малоперспективним через значні енергетичні витрати.

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

У спрощеній формулі (3.3) розрахунку передбачалося, що спектр поглинання атома представлений однією лінією з доплеровським розширенням. У загальному випадку спектр поглинання може складатися з декількох окремих ліній, що відстоять по частоті один щодо одного. Як приклад розглянемо лінію поглинання натрію в жовтій області спектра. Наявність спін-орбітальної взаємодії в атомі обумовлює розщеплення лінії поглинання на дві складові (дублет натрію) з довжинами хвиль 589,692 нм ( $D_1$ ) і 588,995 нм ( $D_2$ ). Співвідношення інтенсивностей  $D_2/D_1$  дублета визначається відношенням статистичних ваг рівнянь  $2P_{3/2}^0$  і  $2P_{1/2}^0$  та дорівнює 2. Отже практичний інтерес представляють

більш інтенсивна  $D_2$  лінія поглинання. У свою чергу ця лінія складається з ряду інших ліній, так званої надтонкої структури, обумовленої власним моментом кількості руху атомного ядра і пов'язаним з ним магнітним моментом.

Енергетична діаграма рівнів  $D_2$  лінії представлена на рисунку 3.2 [10]. Аналіз діаграми рівнів показує, що величина розщеплення S-термів значно перевищує величину розщеплення P-рівней (приблизно в 15 разів). Отже з достатньою для практичного використання точністю P-розщепленням можна знехтувати і вважати, що лінія складається з двох складових, розділених один щодо одного інтервалом, рівним частотному розщепленню S-терма, тобто +1772 МГц. Квантово-механічний розрахунок показує, що співвідношення інтенсивностей компонент і лінії дорівнює 5/3, при цьому великою сумарною вагою володіє більш довгохвильова лінія.

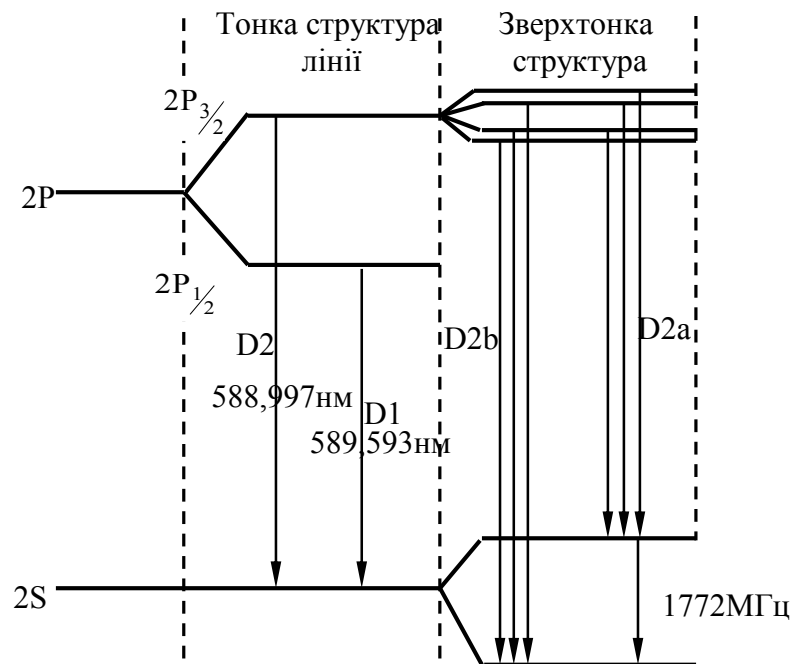


Рисунок 3.2 – Структура рівней атому натрія

Для того, щоб отримати контур спектра поглинання розглянемо спочатку механізми розширення ліній. Оскільки, радіаційний час життя збудженого атома натрію дорівнює  $\tau = 1,6 \cdot 10^{-8}$  сек, то природна ширина лінії  $\Delta\nu_n = 1/\tau \approx 50$  МГц. На висоті 100 км температура дорівнює приблизно

200° К. При максвеловському розподілі швидкостей доплеровська ширина лінії, що визначається температурою атомів, дорівнює [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.

У разі натрію отримаємо  $\Delta\nu_D \approx 1$  ГГц, тобто доплеровське розширення кожних надтонких складових приблизно в двадцять разів більше природної ширини. Отже можна вважати, що розширення ліній повністю визначається ефектом Доплера.

Коефіцієнт поглинання кожної з надтонких складових може бути у вигляді:

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

де  $k_0$  – поглинання в максимумі лінії.

Перетин розсіювання переходу можна визначити використовуючи формулу Кравця [12]:

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

де  $m_e$  – маса електрона;

$e$  – елементарний заряд.

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

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

Спектр поглинання лінії натрію можна отримати підсумовуванням доплеровськи розширених компонент надтонкої структури:

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

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

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

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

На рисунку 3.3 представлена резонансна лінія Na з доплеровським розширенням, що отримана за допомогою розрахунків із використанням формули (26) в залежності частоти для кількох значень температури при опроміненні монохроматичною радіацією. Аналогічним чином можуть бути отримані спектральні профілі поглинання для будь-яких інших атомів. Відзначимо, що відношення перетину розсіювання в максимумі лінії до його значення в мінімумі між піками дуже чутливо до температури. Вимірюючи відношення інтенсивностей зворотньорозсіюваного сигналу при почерговому настроюванні вузькосмуговим лазером на максимум і мінімум лінії можна визначити висотний профіль температури в натрієвому шарі.

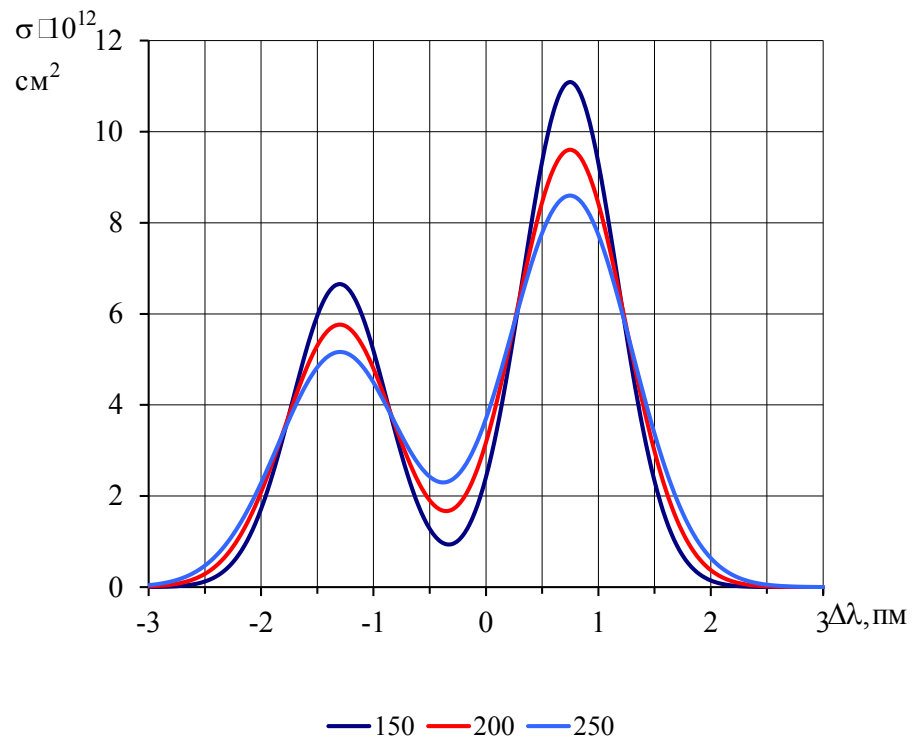


Рисунок 3.3 – Перетин поглинання атому натрія

Необхідно відзначити, що в разі атома натрію для температури порядку  $200^\circ\text{K}$  надбавка до максимального значення діаметра розсіювання за рахунок вкладу сусідньої лінії незначна, оскільки інтенсивність сусідньої компоненти на межах інтервалу частот, відповідному розсіюванню ліній, зменшується приблизно на три порядки. Тому, використовуючи останнє співвідношення, а також формулу (3.8), отримаємо абсолютні значення максимумів перетинів розсіювання і ліній при температурі відповідно  $9,5 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2$  і  $5,7 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2$ . У розрахунках враховувалося, що сили осциляторів для компонент D2 лінії пропорційні їх статистичними вагам. Сила осцилятора D2 лінії в розрахунках приймалася рівною 0,76 [5].

Використовуючи спектр поглинання натрієвої лінії і знаючи спектр випромінювання лазера, що можна розрахувати ефективно значення діаметра розсіювання за формулою (3.2). На рисунку 3.4 представлені результати чисельних розрахунків ефективного значення діаметра розсіювання при температурі  $200^\circ\text{K}$  для двох важливих випадків настроювання генератора – на центр ваги

D2 лінії і на максимальне значення компоненти. У розрахунках використовува-лася гаусова апроксимація спектра випромінювання лазера.

З рисунка видно, що при першому способі настроювання ефективний пе-ретин розсіювання досягає свого максимального значення при ширині спектра-льної лінії випромінювання приблизно рівній сумарній ширині контуру погли-нання. Другий варіант настроювання забезпечує монотонне зростання ефектив-ного значення перетину розсіювання, але збільшення перетину розсіювання при звуженні смуги випромінювання є незначним. Зменшення ширини спектральної лінії випромінювання лазера менш ширини контуру поглинання в першому ви-падку недоцільно, у другому – малоефективно. При ширині спектра випромі-нювання, що перевищує сумарний контур поглинання атома, обидва способи налаштування призводять практично до однакового результату.

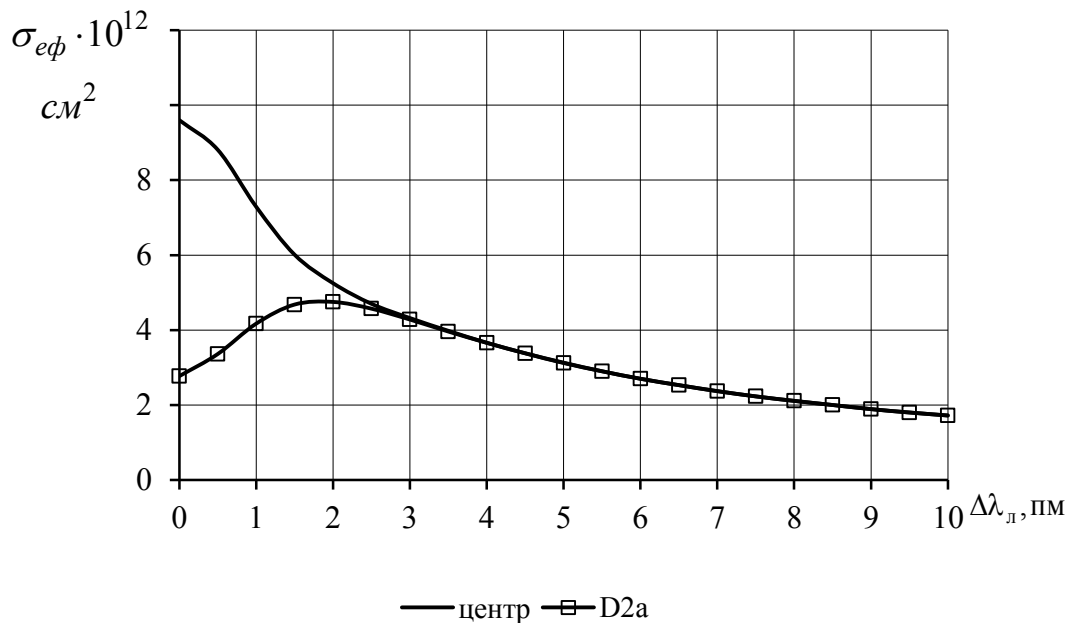


Рисунок 3.4 – Залежність перетину від ширини спектра випромінювання

Оскільки лідарні дані представляють результат накопичення фотовідліків за багатьма реалізаціями, під шириною спектра випромінювання лазера слід розуміти деяке посереднє значення за період підсумовування з урахуванням короточасної і тривалої нестабільності лазерної лінії. У зв'язку з цим становить ін-терес проаналізувати, як нестабільність спектра випромінювання впливає на

характер зміни перетину розсіювання. Для цього в формулу для розрахунку  $\sigma_{ef}$  необхідно ввести значення зсуву довжини хвилі  $\Delta\lambda_d$ . Чисельні розрахунки для гаусових форм спектра і при різній ширині лазерної лінії представлені на рисунку 3.5.

Результати розрахунків показують, що зі зменшенням ширини спектральної лінії вимоги до її стабільності різко зростають. Так, наприклад, при допустимій погрішності через невизначеність значення перетину розсіювання, що дорівнює 10%, допустиме розстроєння для ширини спектра 0,5 пм, 3 пм і 10 пм не повинна перевищувати відповідно 0,2 пм, 0,4 пм і 1,5 пм. Забезпечення нестабільності довжини хвилі генерації менше 0,3 пм представляє серйозну проблему, оскільки при типових довжинах резонаторів в межах 0,5-1 м вказане значення виявляється одного порядку з міжмодовим інтервалом.

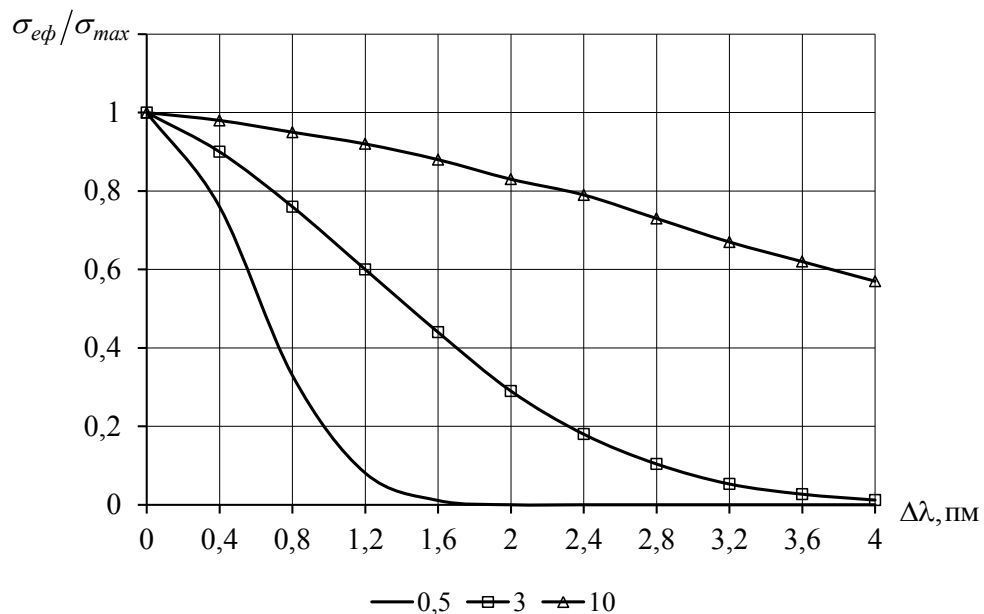


Рисунок 3.5 – Залежність нормованого ефективного перетину розсіювання від зсуву довжини хвилі при зміні ширини спектра випромінювання

З рисунку 3.5 випливає, що при налагодженні генератора на пік поглинання смуги частот генерованого випромінювання, значно менші величини доплерівського розширення за рахунок можливих варіацій температури в висотному інтервалі домішкового шару можуть призводити до появи помилки в

оцінці перетину резонансного розсіювання. Розрахунки показують (рис.3.5), що апіорна невизначеність температури практично не вносить похибку в розрахунок, якщо півширина спектра випромінювання передавача дорівнює або більше півширини сумарного доплерівського контуру поглинання досліджуваного атома.

Таким чином, підбиваючи підсумок сказаному вище можна відзначити, що зменшення ширини спектра випромінювання лідару з метою підвищення  $\sigma_{ef}$  має сенс лише до значень, що визначаються приблизно півшириною контуру поглинання досліджуваної домішки.

### 3.5 Оцінка гранично допустимих значень енергії випромінювання передавача

Відповідно до рівняння лазерної локації (3.1) для збільшення інтенсивності сигналу зворотного розсіювання доцільно збільшувати енергію випромінювання передавального пристрою. При цьому, також, зростає точність відновлення висотного розподілу концентрації досліджуваної домішки, що отримується за даними зондування атмосфери. Оскільки, при обробці даних зондування атмосфери передбачається пуасонівська статистика розподілення фотоелектронів на виході фотоелектронного перетворювача, то, як відомо, відносна статистична похибка вимірювання сигналу в тому чи іншому каналі обернено пропорційна кореню квадратному з числа фотовідліків [5]. Попередні оцінки, отримані із застосуванням лідарного рівняння показують, що при типових параметрах лідарної апаратури і висотному дозволі близько 1 км рівні сигналу не перевищують величин декількох десятків фотоелектронів. Для зменшення статичної помилки зазвичай вдаються до накопичення сигналу протягом багатьох імпульсів. Однак при цьому неминуча втрата інформації про динаміку досліджуваного шару, оскільки при даному способі обробки зростає тривалість сеансу зондування. Таким чином, зі збільшенням інтенсивності сигналу зворотного розсіювання поліпшується відношення сигнал-шум на вході приймального при-

строю і зменшується помилка, обумовлена статистичним характером сигналу. Проте зростання інтенсивності випромінювання може призводити до ефектів насичення атомного переходу і нелінійної залежності між падаючою і розсіяною інтенсивностями. Ця обставина, що тісно пов'язана з характеристиками випромінювача лідара, обумовлена характером взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною і розглядається в рамках даної роботи.

Відомо, що при взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною в відсутність безвипромінювальних переходів мають місце три процеси: поглинання, спонтанне випромінювання і вимушене випромінювання. При цьому для отримання інформації в лазерній локації використовується спонтанне перевипромінювання атомами поглиненої енергії, оскільки саме спонтанне випромінювання внаслідок ізотропного характеру розсіювання потрапляє в апертуру приймального пристрою. При наявності достатньої інтенсивності падаючої хвилі вимушене випромінювання, що поширюється у напрямку падаючого випромінювання, може грати значну роль і вносити похибку в вимірювання.

Запишемо рівняння балансу заселеності в стаціонарному наближенні для двох рівнів атома [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 рівняння (3.10) характеризує потужність вимушеного випромінювання з одиниці об'єму. Відзначимо також зменшення поглинання через зменшення населеності основного рівня.

Якщо інтенсивність випромінювання на висоті зондування мала, то вимушеним випромінюванням можна знехтувати і враховуючи, що  $n_0 \approx n$  можна записати:

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

Згідно з останньому виразу потужність флуоресценції дорівнює в цьому випадку потужності, поглиненої атомами досліджуваної домішки, а поглинута речовиною потужність визначається загальною концентрацією атомів. Отже вимірявши енергію флуоресценції, що потрапляє на приймальний пристрій, можна, використовуючи лідарне рівняння, однозначно визначити невідому концентрацію.

Проаналізуємо більш загальний випадок, коли вимушеним випромінюванням знехтувати не можна. Для цього перше рівняння системи (3.10) переписемо у вигляді:

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

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.

Порівняння отриманого співвідношення з (3.12) показує, що відносна похибка визначення концентрації в цьому випадку дорівнює:

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

Задаючись допустимою величиною похибки можна визначити граничне значення інтенсивності лазерного випромінювання на висоті зондування. Для цього вирішивши рівняння (3.14) щодо  $I$  отримаємо:

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

де  $I_s = h\nu/(\sigma\tau)$  – 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.

На рисунку 3.6 представлена залежність допустимої інтенсивності пучка від заданої похибки вимірювання концентрації домішки.

У виразі (3.10) для спрощення запису знехтувані індекси частоти для перетину і інтенсивності випромінювання. Тому в загальному випадку для отримання остаточних виразів необхідно провести інтегрування по спектру. Отже в виразі для інтенсивності насичення слід вважати ефективне значення перетину розсіювання. Оскільки при зміні ширини спектра випромінювання перетин розсіювання також змінюється, гранично допустима інтенсивність випромінювання буде також змінюватися відповідно.

Оцінимо допустиму величину енергії випромінювання передавача, що випромінює на довжині хвилі натрієвої лінії, якщо відносна похибка вимірювання концентрації не повинна перевищувати 5%, що цілком допустимо в більшості випадків. При цьому для простоти аналізу будемо припускати інтенсивність випромінювання лазера рівномірно розподіленим по перетину пучка, а форму імпульсу прямокутною, тобто потужність постійної протягом тривалості імпульсу.

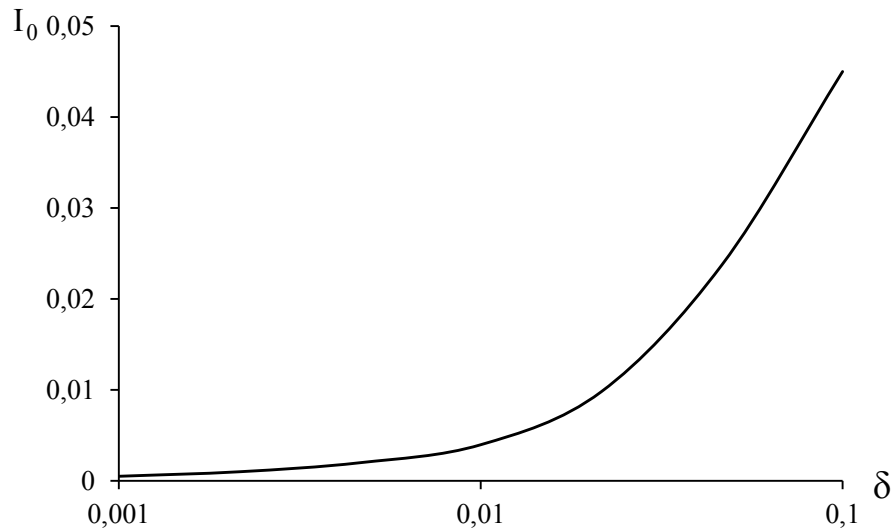


Рисунок 3.6 – Залежність допустимої відносної інтенсивності випромінювання від заданої похибки визначення концентрації

Скористаємося типовими характеристиками випромінювача з ламповим накачуванням в складі лідара, призначеного для нічних спостережень [14]: тривалість імпульсу – 3,3мксек (висотний дозвіл 0,5км); розбіжність випромінювання – 1мрад; ширина спектральної лінії – 5пм. Для заданої спектральної смуги випромінювання, знайдемо, що  $\sigma_{ef} = 3,3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$ . Звідси, з огляду на час життя збудженого стану атома натрію  $\tau = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$  [5], отримаємо  $I_s = 6,3 \text{ Вт/см}^2$ ,  $I = 16,6 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/см}^2$ . На висоті близько 100 км діаметр пучка випромінювання при зазначеній розбіжності дорівнюватиме 100 метрам. Тому допустима потужність передавача без урахування ослаблення при проходженні товщі атмосфери дорівнює  $P = I \cdot S = 16,6 \text{ МВт}$  або, переходячи при заданій тривалості імпульсу до енергії випромінювання, остаточно отримуємо  $E = P \cdot \tau \approx 50 \text{ Дж}$ . Отримане значення значно перевищує енергетичні характеристики існуючих випромінювачів і не є обмеженням. Ситуація змінюється при необхідності зменшення діаграми спрямованості передавача з метою збільшення відношення сигналу до фоновій складовій. Для роботи в денних умовах розбіжність випромінювання повинна бути зменшена приблизно на порядок, а гранична енергія випромінювання для цього випадку зменшиться відповідно на

два порядки і складе 0,5Дж. Аналіз характеристик існуючих на даний момент лідарних випромінювачей показує, що енергія в імпульсі може помітно перевершувати отримане значення. У цьому випадку, очевидно, вибір енергії випромінювання передавача визначається компромісом між похибкою визначення концентрації, обумовленою вимушеним випромінюванням і статистичною похибкою, яка залежить від енергії випромінювання в імпульсі.

Висновки по розділу:

- у випадку системи на резонансній флуоресценції в рівнянні лазерної локації використовується ефективний перетин розсіювання, що характеризує ступінь взаємодії лазерного випромінювання з атмосферною речовиною;

- проведені розрахунки свідчать про те, що ефективний перетин розсіювання сягає свого максимального значення при ширині спектральної лінії випромінювання приблизно рівній сумарній ширині контуру поглинання;

- зменшення ширини спектра випромінювання лідару з метою підвищення  $\sigma_{ef}$  має сенс лише до значень, що визначаються приблизно півшириною контуру поглинання досліджуваної домішки;

- для забезпечення заданої точності визначення концентрації речовини необхідно в кожному конкретному випадку визначати відповідне значення гранично допустимої потужності випромінювання лідару.

## 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 роздільна здатність 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 сягає свого максимального значення при ширині спектральної лінії випромінювання приблизно рівній сумарній ширині контуру поглинання, а для забезпечення заданої точності визначення концентрації речовини необхідно в кожному конкретному випадку визначати відповідне значення гранично допустимої потужності випромінювання лідару.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 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., Дудолодов 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 [Электронный ресурс] / Флуоресцентный лидар для дистанционного зондирования каменных объектов культурного наследия – Режим доступа

[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 28.11.20)

12 Иванов В. И. Многофункциональные лидарные системы / В. И. Иванов, И. А. Малевич, А. П. Чайковский. — Мн. : 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 світлорозсіювальних 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 [Электронный 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 19.11.20)

21 [Электронный ресурс] / Пост – Режим доступу <https://habr.com/ru/post/441706/> (дата звернення 25.11.20)