

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

Аналіз приймальної системи резонансного лідару
(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи РПСКМ-19-1
Калашник В.М.
(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.

Студент

Калашник В. М.

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 Калашнику Владиславу Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз приймальної системи резонансного лідару

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

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22 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 Особливості побудови лідарних приймальних пристроїв 3 Результати аналізу та розрахунки

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	04.11.2020	виконано
2	Огляд лідарних технологій зондування	07.11.2020	виконано
3	Особливості побудови лідарних приймальних	20.11.2020	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: 76 сторінок тексту, 21 рисуноків, 1 таблиця, 41 джерел та 2 додатка

ФЛУОРЕСЦЕНЦІЯ, ЛІДАР, РОЗСПЮВАННЯ, ЛАЗЕР, ЗОНДУВАННЯ

В роботі аналізуються можливості зондування верхньої атмосфери резонансним лідаром та покращення відношення інформативного сигналу до шуму. Проведений огляд лідарних технологій, особливості побудови приймальних систем лідару та їх структурних схем. Проведено аналіз граничних можливостей спектральної селекції сигналу.

Описується засіб захисту ФЕП від перевантажень за допомогою механічного обтюратору завдяки якому вдається запобігти попаданню потужного світлового сигналу лазера на катод ФЕП, як в момент випромінювання зондуючого сигналу, так в плинні часу відповідного зондування висот 15-20 кілометрів.

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

ABSTRACT

The master's degree work consists of an explanatory note containing: 76 pages of text, 21 figures, 1 table, 41 sources and 2 appendices.

FLUORESCENCE, LIDAR, DIFFUSION, LASER, SENSING

The work analyzes the possibilities of probing the upper atmosphere by resonant lidar and improving the ratio of the informative signal to noise. The review of lidar technologies, peculiarities of construction of lidar receiving systems and their structural schemes. An analysis of the boundary possibilities of spectral selection of the signal is carried out.

The protection device of PEM against interferences by means of a mechanical protector is described, which prevents the harsh light laser signal from reaching the cathode of PEM both at the moment of imaging of the conducting signal and during the time of the corresponding probing at heights of 15-20 kilometers.

The work is devoted to the special issues of remote investigation of the atmosphere by means of resonant lidar on the basis of the effect of resonant fluorescence in sodium vapor.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 Огляд лідарних технологій	10
1.1 Принципи дії лідарів	10
1.1.1 Узагальнена структура та принцип дії лідару	10
1.1.2 Принципи дії лідарів для повітряної зйомки	11
1.1.3 Принципи дії лідарів для контролю навколишнього середовища	12
1.1.4 Принципи дії лідарів, що використовуються для аерокосмічних досліджень земної поверхні	12
1.2 Класифікація методів лазерного зондування та галузі застосування лідарів	14
1.3 Технології просторового керування променем	18
1.3.1 Лідар кругового обзору	18
1.3.2 Механічний скануючий лідар	18
1.3.3 Активна ФАР (фазована антенна решітка)	18
1.3.4 Лідар на основі спалахів	18
1.4 Методи вимірювання відстані	19
1.4.1 За часом повернення імпульсу (імпульсний метод)	19
1.4.2 Лідар безперервного випромінювання з ЧМ	21
1.4.3 Лідар безперервного випромінювання з АМ	21
1.4.4 Фазовий метод	21
1.5 Особливості метеорологічних лідарів	22
1.6 Типи систем дистанційного лазерного зондування атмосфери	22
1.7 Порівняльний аналіз методів лідарного зондування	23
1.7.1 Аерозольний лідар	24
1.7.2 Лідари на комбінаційному розсіянні (КР)	26

1.7.3 Лідари на резонансних ефектах	26
1.7.4 Лідар на диференціальному поглинанні ефектах розсіяного випромінювання	27
1.8 Лідарне рівняння	27
1.9 Основні типи лазерів, що використовуються в лідарах	28
2 Особливості побудови лідарних приймальних пристроїв	33
2.1 Фотоприймальні випромінювання	33
2.2 Приймачі лазерного перетворювачі	34
2.3 Класифікація ФП	36
2.4 Принцип дії ФЕП	40
2.5 Метод рахунку фотонів	42
2.6 Сучасні фотоприймальні блоки	44
3 Результати аналізу та розрахунки	49
3.1 Джерела шуму та методи покращення відношення сигнал/шум	49
3.2 Аналіз граничних можливостей спектральної селекції сигналу	52
3.3 Захист ФЕП від перевантаження	56
3.3.1 Особливості роботи ФЕП у широкому динамічному діапазоні сигналів та порівняльний аналіз методів захисту ФЕП від перевантажень	56
3.3.2 Розрахунок обтюратору	57
ВИСНОВКИ	62
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	63
ДОДАТОК А	67
ДОДАТОК Б	80

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БВЧМ – безперервне випромінювання з частотною модуляцією

ДІ – дискримінатор імпульсів

ДП – диференціальне поглинання

ДПР – диференціальне поглинання і розсіяння

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

ФП – Фотоприймальний перетворювач

АМ – Амплітудна модуляція

ЧМ – Частотна модуляція

ФМ – Фазова модуляція

ВСТУП

Серед дистанційних методів контролю атмосфери найбільш ефективними є лідарні, що забезпечується високою інформативністю процесів розсіювання оптичного випромінювання. В основі лідарних технологій лежать, з одного боку, методи і засоби створення оптичного випромінювання, зокрема, імпульсного, а з іншого боку, методи обробки сигналів оптичного діапазону з метою отримання необхідної інформації.

Одним з найбільш перспективних методів дослідження верхньої атмосфери є лідар, який використовує ефект резонансного розсіювання оптичного випромінювання на атомах лужних металів і, зокрема, на атомах натрію. При цьому відкриваються принципово нові можливості визначення складу і динаміки верхніх шарів атмосфери, в тому числі порушених і заряджених компонент іоносфери. Останнє особливо важливо для дослідження аерономічних процесів, знання яких необхідно для побудови детальних моделей верхньої атмосфери. В інтересах прикладної геофізики, метеорології досліджуються шари лужних металів (Na, Ba, Li, Sn, Cs, і ін.), як природного, так і штучного походження.

Актуальність теми визначається необхідністю розширення можливостей технічних засобів вивчення параметрів атмосфери, контролю активних впливів на атмосферу і вивчення динамічних процесів повітряного басейну.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи приймальної систем резонансного лідару.

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

- порівняльний огляд лідарних технологій дослідження навколишнього середовища;
- аналіз особливостей побудови лідарних приймальних пристроїв;
- аналіз можливостей підвищення ефективності роботи приймального пристрою у резонансному лідарі.

1 ОГЛЯД ЛІДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Принципи дії лідарів

1.1.1 Узагальнена структура та принцип дії лідару

Лідар (*Lidar - Light Identification, Detection and Ranging*) - це технологія отримання та обробки інформації дистанційного зондування за допомогою активних оптичних систем (лазерів), що використовують, в тому числі, явища відбиття світла від поверхні Землі з проведенням високоточних вимірювань X, Y, Z координат[1].

Більшість лідарів складається з трьох основних частин (рис 1.1)[2]:

Передавальна частина (а) лідара містить джерело випромінювання - лазер і оптичну систему для формування вихідного лазерного пучка, тобто для управління розміром вихідного плями і розходження пучка.

Приймальна частина (б) складається з об'єктива, спектрального та просторових фільтрів, поляризаційного елемента і фотодетектора. Випромінювання, відбито-розсіяне від досліджуваного об'єкта, концентрується приймальною оптикою, а потім проходить через аналізатор спектру в якому відбувається процес виділення інтервалу довжин хвиль для відсічення фонового випромінювання на інших довжинах хвиль.

Система управління (в) складається з: блока обробки (управління режимом роботи лідара), блоку контролю параметрів вихідного випромінювання (управління частотою зондуючого випромінювання лазера та вимірювання енергії випромінювання у вихідному і прийнятому двочастотному лазерному пучку на обох частотах) та системи виводу інформації (отримання спектральних характеристик атмосфери, визначення наявності і концентрації домішок за наявними в базі даних комп'ютера «спектральним портретів» молекул, управління системою наведення лідара на досліджуваний об'єкт).

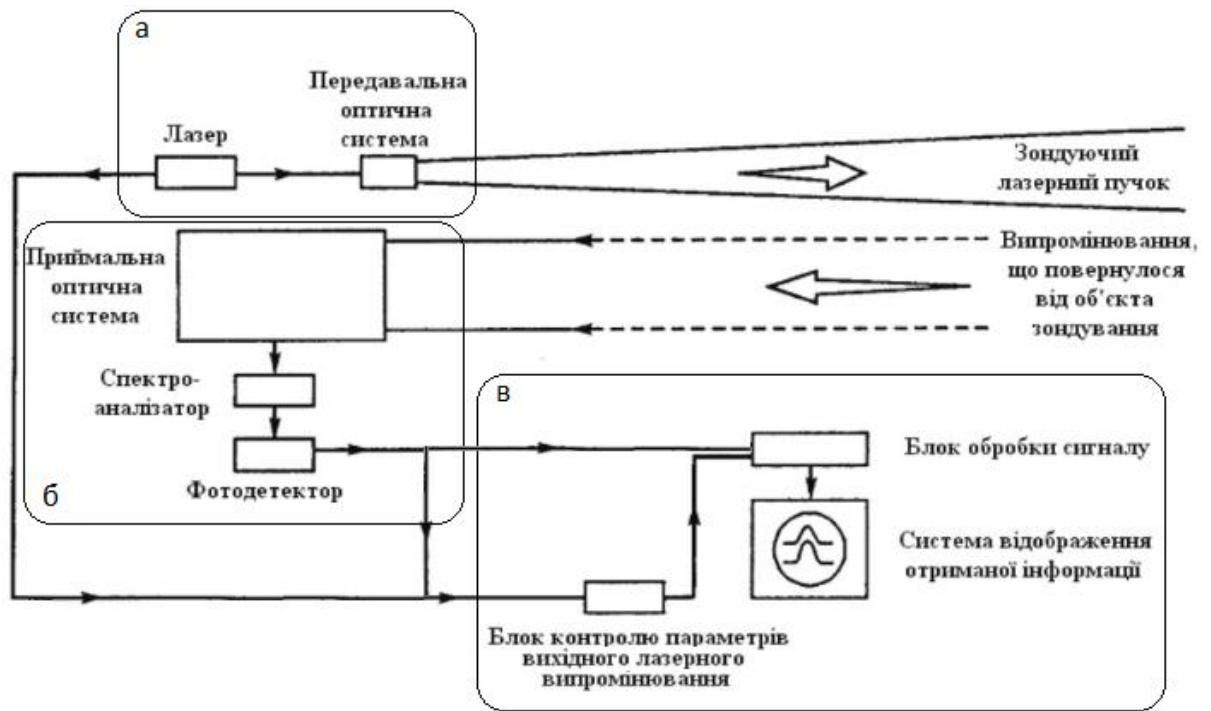


Рисунок 1.1 – Структурна схема лідара

1.1.2 Принципи дії лідарів для повітряної зйомки

Лідар використовувався в повітряній лазерній зйомці та з економічної точки зору прекрасною альтернативою звичної зйомки з використанням фотограмметричної обробки даних. Тобто лідар - це активний оптичний сенсор, що випускає лазерні промені в сторону цілі під час руху літака за спеціальними знімальними маршрутами[3].

Відображення лазера від об'єкта приймається і аналізується сенсором. Приймачі записують точний інтервал часу, що минув з моменту випускання лазерного імпульсу системою до моменту його повернення, для того щоб обчислити відстань між сенсором і об'єктом. Спільно з інформацією про внутрішнє і зовнішнє позиціонування (GPS і INS), ці відстані перетворюються в тривимірні точки, що відображають поверхню відображення лазерних імпульсів.

Найпростіша система роботи є такою:

- випромінювач випромінює промінь, що рухається зі швидкістю світла;
- приймач отримує розсіяне у зворотному напрямку випромінювання;

- комп'ютер розраховує час затримки між поверненням розсіяного випромінювання на приймальний пристрій та моментом імпульсу лазера;
- формується інформація про відстань до об'єкту.

Всі сканери працюють за рахунок променів, але площа покриття залежить від їх кількості. Це може був один лазер, який сканує щільність газу, або смуга, яка формує карту глибини двомірної території.

1.1.3 Принципи дії лідарів для контролю навколишнього середовища

Аналіз біосфери проводять датчиками повсюдно. У NASA є список місій зі звітами по ним. У них досліджують стан озонового шару, шукають зв'язок викидів і клімату і вивчають екосистему. Для останнього іноді навіть задіють супутники. Але в основному в літаки або дрони вбудовують лазери з приймачем, які як валик з фарбою накривають територію під собою. А вчені на базі цих даних будують карти матеріалів і ґрунту. Агрікультура і міське планування займають перше місце по застосуванню лідарів. Аналіз землі і повітря допомагає вибрати місця для родючих полів такі, щоб уникнути зсувів і забрудненого повітря.

1.1.4 Принципи дії лідарів, що використовуються для аерокосмічних досліджень земної поверхні

Основними компонентами апаратного забезпечення лідара є: транспортний засіб або пристрій (супутник, літак, вертоліт), система лазерного сканування, GPS (Глобальна система позиціонування) і INS (Внутрішня система позиціонування).

Лазерні імпульси, що випромінюються лідаром, відбиваються як від об'єктів, що знаходяться на поверхні землі, так і від тих, які знаходяться над землею: від рослинного покриву, будівель, мостів і т.ін. Один лазерний імпульс може відбиватися від об'єкта і повертатися до приймача як один раз, так і кілька. Будь-який лазерний імпульс зазнає кілька відбиттів при його русі до зем-

ної поверхні, розділяючись на стільки частин, в залежності від скількох поверхонь він відбився (рис.1.2)[3].

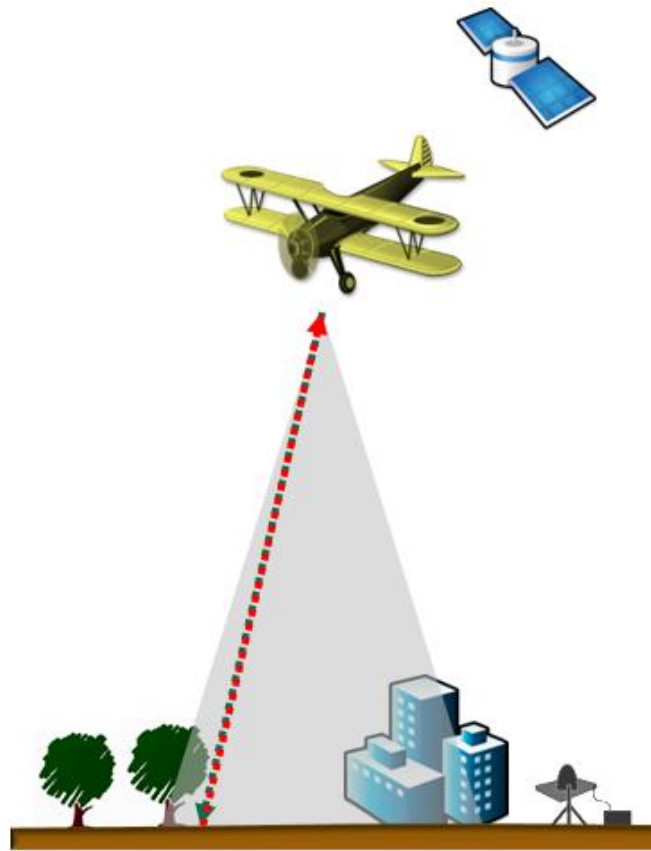


Рисунок 1.2 – Відбиття лазерних імпульсів лідара від поверхні землі

Перший за часом прийнятий сигнал є найбільш показовим і відповідатиме найвищому об'єкту ландшафту, такому як, наприклад, верхівка дерева або дах будівлі. Перший відбитий сигнал може також відповідати і земній поверхні. В цьому випадку лідаром буде захоплено тільки одне відбиття.

Велика кількість відбитків випромінювання використовується для отримання висот декількох об'єктів, що знаходяться на шляху лазерного променя. Відбиті сигнали з середини "спектру" зазвичай відповідають рослинності, а останні за часом відбиті сигнали використовуються для моделей власне поверхні землі. Останнє відбиття, однак, не завжди буде відповідати поверхні землі. Наприклад, розглянемо випадок, коли імпульс потрапляє в товсту гілку і не до-

сягає земної поверхні (рис.1.3)[3]. В цьому випадку останнє відбиття сталося не від землі, а від гілки.

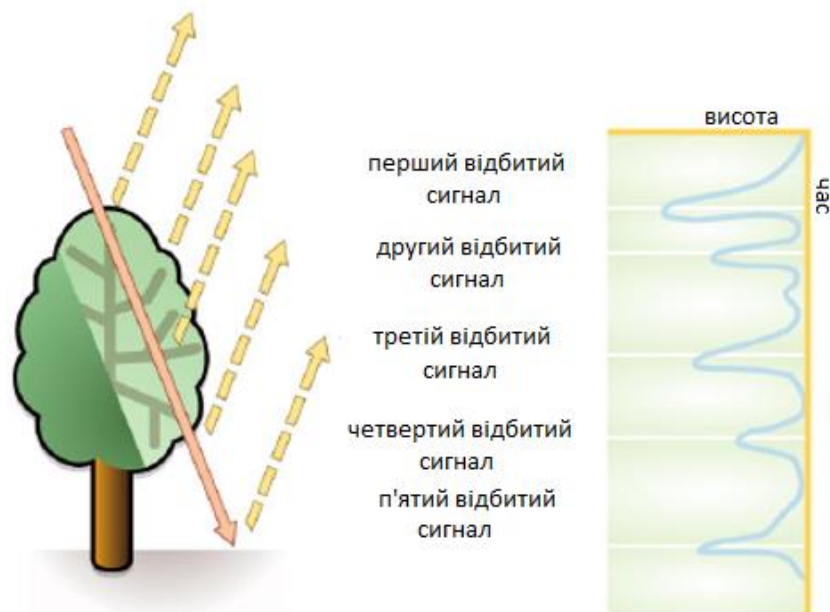


Рисунок 1.3 – Множинне відбиття сигналу

1.2 Класифікація методів лазерного зондування та галузі застосування лідарів

В основі методів лазерного зондування лежать такі процеси взаємодії лазерного випромінювання з речовиною: аерозольне розсіяння (АР); молекулярне розсіяння (МР); комбінаційне розсіяння (КР); флуоресценція (люмінесценція), у тому числі і резонансна; резонансне розсіяння (РР) і резонансне поглинання (РП); диференціальне поглинання і розсіяння (ДПР). Класифікація систем лідарного зондування атмосфери приведена на рис. 1.4 [4].

Стаціонарні системи, встановлюються в приміщеннях або на спеціально обладнаних майданчиках, володіють високим енергетичним потенціалом, тобто мають приймальні об'єктиви великих розмірів і лазери зі значною енергією випромінювання. Вони забезпечують великий інтервал дальності зондування, але при цьому вони є громіздкими, дорогими системами і мають обмежену локаль-

ну просторову область вимірювань, прив'язану до точки їх розміщення. Основною їх перевагою, є можливість одночасного моніторингу декількох атмосферних параметрів з високою чутливістю.

Мобільні лідари розміщені на рухомих засобах мають розширені можливості для моніторингу атмосфери на значній території, особливо в разі їх установки на аерокосмічних носіях. Системи мобільного лідара можуть включати різну кількість сенсорів. Мобільні системи, як правило, складаються з лазерного сенсора, камер, GPS і INS (Внутрішньої навігаційної системи), так само як і системи, застосовувані для лазерної аерозйомки[3,4].

Топографічний лідар використовується для отримання моделей поверхні для їх використання в різних сферах діяльності, таких як, наприклад, лісове господарство, гідрологія, геоморфологія, містобудування, ландшафтна екологія, гідротехнічні роботи, оцінка точності досліджень і об'ємні обчислення[4].



Рисунок 1.4 – Класифікація систем лідарного зондування атмосфери

Аерозольні лідари, що використовують ефект пружного розсіювання застосовуються для визначення наступних атмосферних характеристик:

- профілів прозорості і масової концентрації аерозольних забруднень;
- меж хмар та інших великомасштабних неоднорідностей атмосферного середовища;

- фазового складу хмар, а також динаміки зміни цих характеристик у заданому інтервалі часу.

Крім того, за допомогою сканування атмосферного простору лазерним променем можна проводити картування забруднювальних речовин в атмосфері. Поляризаційні лідари, які є різновидом аерозольних лідарів, використовуючи для зондування поляризоване випромінювання і виділяючи у прийнятому потоці випромінювання компоненти з різними станами поляризації, дозволяють отримати додаткову інформацію про форму аерозольних часток, при однократному розсіюванні і показник багаторазового розсіювання оптично щільних аерозольних утворень.

В основі лідарів ДП (диференціального поглинання) лежить взаємодія оптичного випромінювання з молекулами атмосферних газів – резонансне поглинання, що й визначає основні переваги цих технічних засобів, а саме – високу чутливість і оперативність визначення вмісту газових складових атмосфери, у тому числі і з великою дальністю зондування. Для визначення концентрації будь-якого компонента атмосфери використовуються лазерні джерела випромінювання, здатні генерувати одночасно або послідовно випромінювання на двох близьких довжинах хвиль. Одна з яких в ідеальному випадку збігається із лінією поглинання досліджуваного газового компонента, а інша повинна попадати у найближче вікно прозорості атмосфери. Концентрація газу визначається із порівняння рівня зареєстрованих сигналів на цих довжинах хвиль. В залежності від поставленого завдання в лідарах ДП фотоприймач реєструє оптичні ехосигнали, які відбиті дзеркалами, кутовими відбивачами, або топографічними об'єктами: деревами, будинками, пагорбами і т. п. В результаті лідари ДП визначають усереднені по трасі зондування концентрації газових компонентів. Недоліком методу ДП є неможливість отримання просторового профілю концентрації уздовж траси зондування.

Для дослідження просторового розподілу газових компонентів застосовуються лідари ДПР, у яких в якості розподілених відбивачів використовуються атмосферні аерозолі або молекули повітря.

Поглинання атомами або молекулами лазерного випромінювання на частоті певного електронного переходу, яке супроводжується перевипромінюванням, характеризує флуоресценцію компонентів атмосфери, що використовується для створення флуоресцентних лідарів.

У випадку атомної флуоресценції перевипромінювання світла збудженим атомом здійснюється на тій самій довжині хвилі, що і поглинання та має назву резонансного розсіювання (РР), а лідари, які використовують це явище – резонансними. Суттєвою перевагою цього методу є винятково висока чутливість завдяки великій величині перетину резонансного розсіювання атома. Недоліком – порівняна складність апаратурної реалізації, оскільки у складі такого лідару має бути лазерний випромінювач, здатний до перестроювання довжини хвилі.

У випадку молекулярної флуоресценції довжина хвилі перевипромінювання здійснюється на більш нижчій довжині хвилі, порівняно з поглиненою, і обумовлена структурою молекули. На практиці молекулярні флуоресцентні лідари не отримали значного поширення через низку причин:

- у молекулах газів флуоресцентне випромінювання широсмугове і затягнуте в часі, що ускладнює ідентифікацію компонентів атмосфери і зменшує відношення сигнал/шум;

- флуоресценція всіх молекул істотно гаситься зіткненнями з іншими молекулами повітря (тушіння флуоресценції);

- газові компоненти, що мають максимальні значення флуоресценції, присутні в атмосфері в мінімальній кількості.

Перевагою лідарів КР (комбінаційного розсіювання) є можливість одночасного детектування всіх молекулярних компонентів газового середовища, оскільки кожна газова молекула має фіксовані згідно її структури коливально-обертальні спектри частот, на які зміщується частота розсіяного випроміню-

вання. При цьому потужність сигналу КР будь-якого компонента прямо пропорційна його концентрації. Метод КР є практично безінерційним. Завдяки такому універсальному комплексу властивостей, він особливо перспективний для якісного і кількісного аналізу газових середовищ. Основним недоліком методу є мала інтенсивність сигналів КР, пов'язана з малими значеннями перетину комбінаційного розсіювання. Тому лідари на основі цього методу традиційно використовувалися в основному для аналізу високих рівнів концентрацій газових компонентів атмосфери (димових викидів), що перебувають на невеликій висоті. Однак, використання потужних лазерів і великогабаритної оптики дозволяє визначити профілі розподілу вологості і температури по всій товщині атмосфери.

1.3 Технології просторового керування променем

1.3.1 Лідар кругового обзору

Як правило в такій системі лазери установлені на платформі, що обертається зі швидкістю в кілька оборотів за секунду навколо вертикальної висі. Основна перевага такої конструкції - покриття на 360 градусів, але така технологія має свої недоліки, а саме: вартість та надійність конструкції[5].

1.3.2 Механічний скануючий лідар

Такий лідар перенаправляє єдиний лазерний промінь за допомогою скануючого дзеркала. Деякі компанії використовують технологію з назвою «мікроелектромеханічна система» (МЕМС) для управління дзеркалом.

1.3.3 Активна ФАР (фазована антенна решітка)

Лідар з ФАР використовує ряд випромінювачів, здатних змінювати напрямок сканування лазерного променя, за допомогою зміни фаз окремих випромінювачів[5].

1.3.4 Лідар на основі спалахів

Основна перевага такого лідара що він сканує всю область відразу завдяки використанню одного ширококутного лазера. В цієї технології існує значний недолік – вона підходить тільки для невеликих відстаней, оскільки лазер розповсюджує всю потужність одночасно на велику площу і в кожному окрему точку потрапляє лише мала частина лазерного світла. Існує рішення з використанням багатолазерного спалаху, для цього потрібний масив лазерів, спрямованих на 360 градусів[5]. Такий спалах повинен мати достатню потужність для сканування на більші відстані.

1.4 Методи вимірювання відстані

1.4.1 За часом повернення імпульсу (імпульсний метод).

Лідар відправляє короткий імпульс і вимірює, скільки часу пройде до фіксації розсіяного у зворотному напрямку випромінювання. До об'єкта посиляють зондувальний імпульс (рисунок 1.5), який запускає часовий лічильник в далекомірі, а відображений об'єктом імпульс - зупиняє роботу лічильника. По тимчасовому інтервалу автоматично висвічується перед оператором відстань (R) до об'єкта (рис. 1.5)[6]. На рис. 1.5 представлена типова форма зондувального лазерного імпульсу в перспективних лідарах типу ALTM канадської компанії Ortech Inc., а на рис. 1.6 показана принципова схема приймач-передавача при реалізації даної схеми вимірювання.

Подальшим перспективним розвитком імпульсного методу є, так званий, метод реєстрації форми відображеної хвилі, який передбачає запис в цифровому виді повної форми відгуку на кожний зондувальний імпульс з частотою дискретизації 1 ГГц і вище. Зареєстрована таким чином хвиля дає "історію" віддзеркалення зондувального імпульсу від всіх перешкод, що зустрілися на його шляху (рис. 1.7).

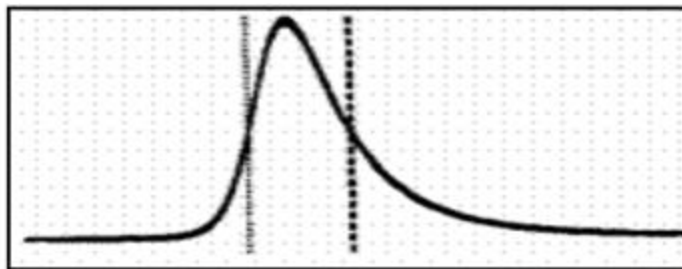


Рисунок 1.5 – Типова форма зондувального імпульсу імпульсного методу локації

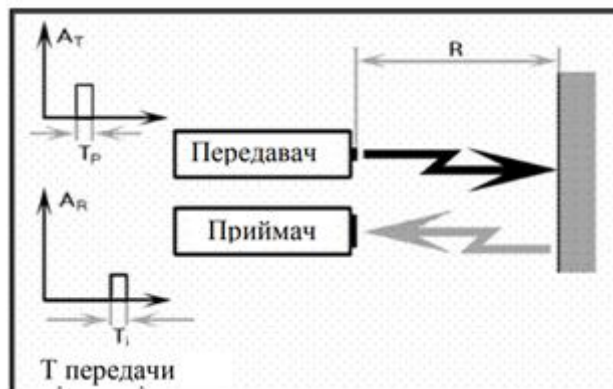


Рисунок 1.6 – Принципова схема імпульсного методу локації.

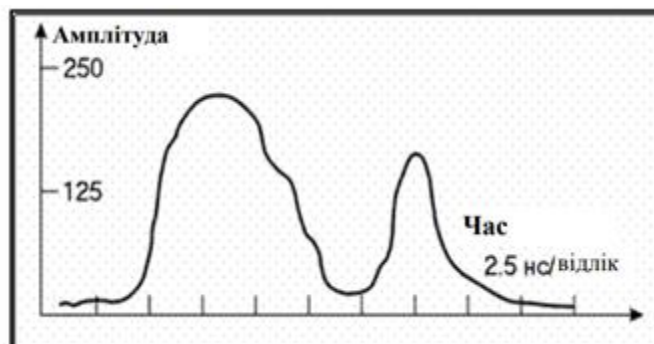


Рисунок 1.7 – Форма віддзеркалення хвилі

Просторова роздільна здатність ΔR імпульсного методу визначається формулою [17]:

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau_i}{2},$$

де c – швидкість світла; τ_i – тривалість часу лідарного імпульсу.

1.4.2 Лідар безперервного випромінювання з частотною модуляцією (НІЧМ).

Лідар відправляє безперервний промінь світла, частота якого постійно змінюється в часі. Промінь розділяється на дві частини, і лише один з них випромінюється для сканування та потім по поверненню об'єднується з іншим. Оскільки частота у джерела променю змінюється безперервно, різниця в шляху двох променів виражається через різницю їх частот. Лідар НІЧМ може також використовувати доплерівське зміщення для вимірювання швидкості об'єктів, а не тільки відстані до них[5].

1.4.3 Лідар безперервного випромінювання з амплітудною модуляцією (НІАМ).

Такий лідар можна розглядати, як компроміс між двома попередніми варіантами. Лідар відправляє сигнал, а потім вимірює час, яке у нього пішло на те, щоб відбитися і повернутися. Але якщо прості системи відправляють один імпульс, лідар НІАМ відправляє складний сигнал (псевдовипадковий потік цифрових нулів і одиниць). Завдяки цьому лідар НІАМ має бути більш стійким до інтерференції.

1.4.4 Фазовий метод

Суть фазового методу полягає в тому, що лазерне випромінювання модулюється по синусоїдальному закону. При цьому інтенсивність випромінювання змінюється в значних межах. Залежно від дальності до об'єкта змінюється фаза сигналу, що впав на об'єкт. Відображений від об'єкта сигнал прийде на приймальний пристрій також з певною фазою, залежною від відстані (рис. 1.8)[6]. Режим роботи далекоміра передбачає короткі вимірювання протягом довгого часу. До найперспективніших лазерних далекомірів відносяться: лазерний далекомір LP-4; танковий LD AN/VVS-1.

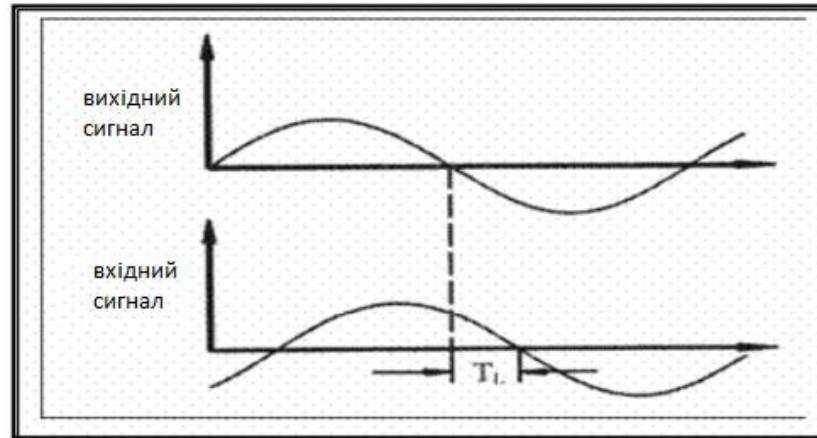


Рисунок 1.8 – Принципова схема фазового методу локації

1.5 Особливості метеорологічних лідарів

Незважаючи на широке коло завдань метеорологічної локації метеорологічні лідари (МЛ) мають досить загальні структурні схеми. Основними тактико-технічними характеристиками МЛ є: дальність дії, точність вимірювань визначених параметрів, час вимірювань, час обробки первинної інформації і конструктивне відповідність конкретним завданням. Зазвичай, в метеорологічних лідарах використовується імпульсний метод вимірювання відстані.

За своїм призначенням МЛ можна розділити на кілька основних типів:

- для визначення просторово-часових варіацій аерозолі в приземному шарі повітря, характеристик хмар і туманів;
- для зондування тропосфери, стратосфери і мезосфери з метою вивчення атмосферного аерозолі і конкретних метеорологічних параметрів.
- для визначення газових компонент в приземному шарі (до декількох кілометрів) атмосфери методом спонтанного комбінаційного розсіювання (СКР) або резонансного поглинання[13].

1.6 Типи систем дистанційного лазерного зондування атмосфери

Залежно від джерела випромінювання методи дистанційного зондування атмосфери можна розділити на дві великі категорії: активні і пасивні. Пасивні

методи використовують природне випромінювання, що відбувається в атмосфері (наприклад, сонячне і відбите або випускається землею випромінювання). За спостереженнями взаємодії цього випромінювання з досліджуваними компонентами (поглинання і розсіювання) витягують інформацію про концентраціях. Активні методи, навпаки, характеризуються введенням в атмосферу певного випромінювання, але зазвичай в якості джерел такого випромінювання використовуються лазери. Інформація про концентрацію досліджуваних компонентів витягується з спостережень таких видів взаємодії випромінювання з атмосферою, як розсіювання, поглинання і флуоресценція.

1.7 Порівняльний аналіз методів лідарного зондування

Розглянемо лідарні системи, що працюють на активних методах, принципове поділ їх на типи можна подивитися на рис 1.9[34]:



Рисунок 1.9 – Схематичний розподіл активних методів дистанційного зондування атмосфери

Методи лідарного зондування атмосфери розробляються для вирішення ряду завдань, в тому числі, для дистанційного визначення аерозольного складу атмосфери і похилій дальності видимості. Інтерпретація отриманих даних ґрунтується на зверненні лідарного рівняння. Це рівняння пов'язує сигнал зворотного розсіювання з двома параметрами атмосфери (коефіцієнтом зворотного розсіювання β і коефіцієнтом ослаблення σ). Вони не можуть бути визначені з одного лідарного рівняння при однопозиційному зондуванні. Багаторічна робота в рамках підходу однопозиційного зондування привела до створення методів інтерпретації лідарних даних, які базуються на апріорних припущеннях про стан середовища і не знаходять широкого застосування для вирішення практичних завдань.

1.7.1 Аерозольний лідар

Ця схема лідара набула найбільшого поширення на основі моностатичних систем. Вона полягає в поєднанні джерела і приймача випромінювання, тобто, приймач і джерело випромінювання встановлюють в одному місці, наприклад на поворотному пристрої, що дозволяє змінювати зенітний кут і азимут зондування. Для зондування використовують кілька варіантів систем: однохвильові, багатохвильові і поляризаційні. Різноманіття таких систем пов'язане з важливістю отримання інформації про фізичні параметри атмосферного аерозолі, які найчастіше визначають тип забруднення. У той же час отримання такої інформації є технічно складним завданням в зв'язку з різноманіттям типів аерозолів.

У найпростішому випадку лазер в лідара використовується просто як джерело придатних за величиною імпульсів енергії з досить короткою тривалістю. Найчастіше використовують твердотільні лазери, що працюють на довжинах хвиль 532 нм і 1064 нм, що генерують імпульси з піковою потужністю, вимірюваної десятками мегават, при тривалості 10 - 20 нс. Імпульси з такою енергією формуються в пучки відповідними оптичними системами, приклад яких схематично зображено на рис. 1.10.

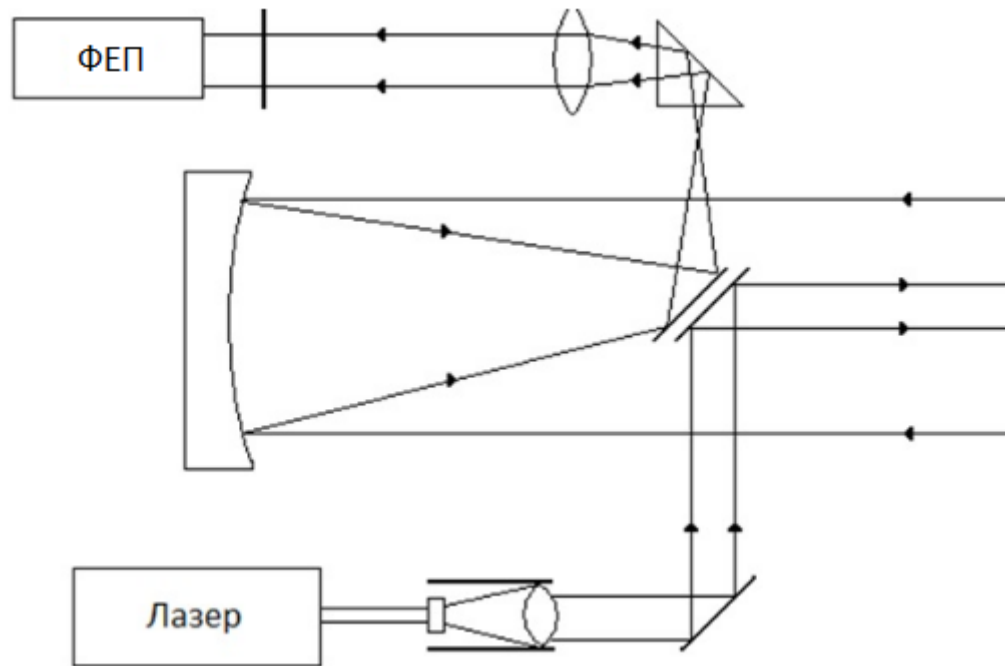


Рисунок 1.10 – Схематичне зображення основної конструкції лідара з коаксіальною геометрією приймально-передавача

Лазерне випромінювання монохроматично і у високому ступені когерентно, має малу розбіжність. Молекули газів, частинки і краплі, з якими стикається лазерне випромінювання при поширенні в атмосфері, викликають розсіювання. Невелика частина цього випромінювання розсіюється назад в напрямку лідарної системи і може бути виявлена. У лідара розсіяне назад випромінювання збирається у відповідному приймачі за допомогою відбиває або заломлюючої оптики і направляється на фотодетектор (зазвичай фотопомножувач), який перетворює його в електричний сигнал; інтенсивність цього сигналу в будь-який момент часу пропорційна приймається оптичному потоку. Оскільки світло поширюється з певною швидкістю, відстань до розсіює об'єкту, з якого прийнято сигнал, в будь-який момент часу може бути визначено за величиною часу з моменту запуску імпульсу. Величина прийнятого сигналу визначається здатністю атмосфери розсіювати випромінювання в напрямку назад на послідовних ділянках траси, а також атмосферних ослабленням на подвійному шляху. Розсіювання назад в атмосфері залежить в свою чергу від використовуваної довжини

хвилі лазерного випромінювання, числа, розміру, форми і заломлюючих властивостей частинок, крапель (або молекул), що знаходяться на шляху падаючого випромінювання.

1.7.2 Лідари на комбінаційному розсіянні (КР)

Лідар на КР використовується для вимірювань ряду молекул атмосфери, включаючи H_2O , CO_2 , а також шкідливі домішки SO_2 , NO_2 , NO і т.ін. Його використання вимагає потужних лазерів, великих телескопів, тривалих часів накопичення і зазвичай обмежена вимірами високих концентрацій молекул.

1.7.3 Лідари на резонансних ефектах

Лідар на резонансних ефекти характеризується ретельним підбором як довжини хвилі випромінювання лазера, так і довжини хвилі випромінювання, що реєструється приймачем, для того щоб вони збігалися з довжиною хвилі лінії поглинання досліджуваного компонента атмосфери. Збудження атому (молекули) випромінюванням на частоті поглинання призводить до резонансного розсіювання, яке може бути значно (на багато порядків) інтенсивнішим, ніж нерезонансне розсіювання.

Резонансний лідар - це активна методика дистанційного зондування для моніторингу незначних домішок в атмосфері. Він заснований на виявленні флуоресценції атомів, збуджених резонансно настроюваним лазером.

Резонансна флуоресценція - це процес, при якому енергія що надходить у фотон збігається з енергією переходу в рівень схема атома або іона, і відновлюється при тій же довжині хвилі. Резонансна флуоресценція широко використовується для аналітичних цілей через високі, вузькі піки резонансної лінії. Це призводить до високої чутливості та високої селективності аналізу. Резонансний процес передбачає як поглинання, або втрату, так і зворотне випромінювання, або розсіювання первинного випромінювання.

Резонансне лідарно-дистанційне зондування є лідарним методом, який дає можливість виявити та виміряти спектр світіння (флуоресценцію) мішені

або аерозолі в повітрі при підсвічуванні лазером з потрібною довжиною хвилі [8].

Резонансний лідар складається з лазера, телескопа, дисперсійної системи і детектора. Лазерний промінь, який також може бути колімірованим за допомогою розширювача пучка, направляється на ціль, викликаючи її світіння. Флуоресценція мішені, яка містить інформацію про фізико-хімічні характеристики мети, збирається телескопом і потім направляється в спектрометр.

Цей метод успішно застосовується для вимірювання концентрацій атомарних натрію і калію на великих висотах (до 100 км). Однак завдяки зіткненню тушінню флуоресценції його реалізація можлива на висотах більш ніж 50 км.

1.7.4 Лідар на диференціальному поглинанні розсіяного випромінювання

Його робота залежить від розсіювання на аерозолях атмосфери, але вимірювання обраного виду молекул здійснюються за їх поглинання. В основу її роботи закладено використання принаймні двох лазерних пучків з різними довжинами хвиль, які послідовно або одночасно надсилаються уздовж одного і того ж напрямку в атмосферу. Перший лазерний пучок поглинається досліджуваними молекулами, в той час як другий пучок з близької довжиною хвилі поглинається не надто сильно. Так як пучки відрізняються невеликим проміжком довжин хвиль, то перетину аерозольного розсіювання можна вважати практично однаковими для обох випадків. Різниця в інтенсивності розсіювання променів в атмосфері можна вважати обумовленим різницею в їх поглинанні досліджуваними молекулами. Аналіз зареєстрованих сигналів від обох променів як функція часу дозволяє здійснювати просторово-дозволені вимірювання концентрації поглинаючих молекул.

1.8 Лідарне рівняння

Основні принципи лазерного зондування можуть бути виражені таким лідарним рівнянням [18]:

$$P_r(R) = P_0 \left(\frac{c\tau}{2} \right) \beta_\pi(R) A_r R^{-2} \exp(-2 \int a(r) dr), \quad (1.1)$$

Де: $P_r(R)$ - миттєве значення прийнятої потужності в момент часу t ;

P_0 – відправна потужність в момент часу t_0 ;

c - швидкість світла;

τ - тривалість імпульсу;

$\beta_\pi(R)$ - коефіцієнт розсіювання назад на висоті R ;

R - відстань до об'єкту;

A_r - ефективна площа антени приймача;

$\alpha(r)$ - об'ємний коефіцієнт поглинання на поточній відстані r елементарного прошарку атмосфери dr .

Об'ємний коефіцієнт розсіювання назад $\beta_\pi(R)$ визначається як частка падаючої енергії, розсіяна в одиничному тілесному куті (стерадіан) в напрямку назад ділянкою атмосфери одиничної довжини (він має розмірність $\text{м}^{-1} \text{ср}^{-1}$).

Ефективна площа приймача A_r входить в лідарного рівняння через те, що вона визначає тілесний кут A_r/R^2 , під яким приймач видно з відстані R (за умови, що кут розходження посилається пучка не перевищує кут прийому і вся випущена лазером енергія вносить вклад в розсіювання назад з відстані R).

Вираз $\exp(-2\int \alpha(r) dr)$ представляє собою пропускання випромінювання атмосферою на подвійному шляху між лідаром і об'єктом з відстанню R . Воно залежить від α - об'ємного коефіцієнта ослаблення атмосфери, який показує, у скільки разів зменшується потік випромінювання на одиничному шляху в напрямку поширення (має розмірність м^{-1}).

1.9 Основні типи лазерів, 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.1.1 [24]. Конкретний тип лазера і його конструкція визначаються з ураху-

ванням 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 багатокомпонентного газового аналізу, мобільні лідари та ін.) розробляються спеціальні пристрої, які за технічними характеристиками і конструкцією істотно відрізняються від типових 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 лазери з мінімальними кутами розбіжності пучка, а частота повторення імпульсів яких може бути 10 Гц і вище. 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 % [20].

Таблиця 1.1 – Параметри лазерів, що застосовуються в лідарах

Вид взаємодії	Тип лазера та середовища	Довжина хвилі
	Рубін	0,694 і 0,347
	Неодимове скло	1,060 і гарм.
	Алюмітрієвий гранат	1,064 і гарм.

АР і МР	Барвники	0,26-1,1
	CO ₂ - 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
АР і МР	2-га гармоніка на неодимовому склі	0,530
	2-га гармоніка на алюмінієвому нранаті	0,532
КР, РР, Резонансне КР, РП	Рубін	0,347
	Азотні лазери	0,337
	Пари міді	0,510 і 0,578
	Ексімерні лазери	0,2-0,35
	Рубін	0,694
	CO ₂ - лазери	9-11
	Барвники	0,26-1,1
	Лазери на центрах фарбування в іонних кристалах	0,7-1,5

Клас газових лазерів найбільш різноманітний: у нього входять коротко- і довгохвильові лазери. CO₂-лазер низького тиску генерує імпульси з енергією 1...10 Дж і частотою повторення до 10 Гц і може досягати ККД 30 %. У перших КР-лідарах використовувався і азотний лазер. Для дистанційного зондування становлять інтерес ексімерні лазери на молекулах ХеСl і КrF, тому що довжини хвиль їх випромінювання лежать в УФ-області спектра (менше 308 нм), тривалості імпульсів 10...20 нс з енергією до 0,5 Дж [38].

Широке застосування імпульсних газових лазерів на парах міді дозволяє отримувати такі характеристики: безперервна сумарна потужність на довжинах хвиль 510,6 й 578,2 нм – 43,5 Вт з частотою повторення імпульсів 20 кГц і імпульсною потужністю – 200 кВт при тривалості імпульсу 10 нс.

Всі імпульсні лазери на барвниках можна розділити на два окремих класи: з накачуванням імпульсною лампою і імпульсним твердотільним лазером. Лазери із накачуванням імпульсною лампою можуть генерувати імпульси тривалістю 0,1—10 мкс з перестроюванням довжини хвилі в діапазоні 300—700 нм

і піковою потужністю більше 1 МВт. У тих випадках, коли потрібні більш короткі (1—20 нс) лазерні імпульси накачування барвника здійснюється за допомогою твердотільного лазера з модуляцією добротності або імпульсного газового лазера.

Використання блакитного лазерного діоду з такими характеристиками: квазібезперервна потужність на довжині хвилі 419 нм сягає 135 мВт при частоті проходження імпульсів 20 кГц і імпульсній потужності 5 Вт при тривалості імпульсу 100 нс відкриває нові перспективи в напрямку застосування твердотільних напівпровідникових лазерів в спектроскопічних експериментах. При цьому можна отримувати лазерні імпульси тривалістю 100 нс із частотою проходження до 200 кГц на довжинах хвиль 419, 678, 780 й 820 нм і з піковими потужностями до 100 Вт. До головних переваг напівпровідникових лазерів варто віднести невеликі розміри і експлуатаційну надійність конструкції, пряме електричне збудження із можливістю швидкого перестроювання довжини хвилі за рахунок зміни густоти струму, високий ККД (більше 50 %, у інжекторних наближається до 90 %) і широкий спектральний діапазон (0,4 – 34 мкм). Напівпровідникові лазери відрізняє невелика пікова потужність (до 100 Вт) і велика розбіжність променю [3, 4]. Однак, висока частота проходження імпульсів дозволяє при реєстрації лідарного сигналу скоротити час накопичення імпульсів при збереженні статистичної точності вимірювань на дистанції зондування.

Висновки за розділом:

- лідарні системи є ефективними інструментами для безконтактного дистанційного контролю навколишнього середовища;
- серед методів визначення відстані до об'єкту дослідження найчастіше використовується імпульсний, суть якого полягає в фіксації часу проходження лазерного імпульсу від передавача до цілі та в зворотному напрямку до приймача;

- резонансний метод лазерного зондування атмосфери, який ґрунтується на ефекті атомної флуоресценції, серед усіх лідарних методів є найбільш чутливим завдяки максимальній величині перетину розсіювання. Однак реалізація цього методу можлива при наявності лазера, здатного до перестроювання довжини хвилі;

- серед відомих лазерних випромінювачів, придатних для роботи у складі резонансних лідарів найбільш ефективними є лазери на органічних сполуках, які дозволяють забезпечити плавне перестроювання довжини хвилі.

2 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ЛІДАРНИХ ПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

2.2 Фотоприймальні перетворювачі

Фотоприймальний перетворювач (ФП) - це оптоелектронний прилад, призначений для прийому і перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну енергію або в оптичне випромінювання іншого діапазону. Фотоприймач є одним з ключових компонентів системи демодуляції і обробки сигналу оптичного діапазону [12].

Фотоприймальний перетворювач є одним з найважливіших елементів лазерних систем. Для прийому випромінювання в лазерних інформаційних системах і приладах контролю і перевірки працездатності їх використовуються перетворювачі оптичного випромінювання в електричний сигнал. Пристрої перетворення - фотоприймачі будуються на основі використання зовнішнього або внутрішнього фотоефекту, тобто явища, при якому падаючі на матеріал приймача фотони переводять електрони цього матеріалу в таке збуджений стан, при якому може бути здійснена їх реєстрація. Крім зазначених, фотонних фотоприймачів існують також теплові, проте вони поступаються фотонним по ряду параметрів і в лідарній апаратурі не використовуються.

Приймачі на основі фотоефекту характеризуються спектральним діапазоном роботи, який визначається, з одного боку, червоним кордоном фотоефекту (в області великих довжин хвиль), а з іншого, короткохвильовим - спаданням чутливості фотоприймача з ряду інших причин. Оскільки різні типи лазерів генерують в широкому діапазоні довжин хвиль (від ультрафіолетового до далекого інфрачервоного), то для кожного виду лазерів в залежності від діапазону генерації і режиму роботи (імпульсного або безперервного) найкращим виявляється певний вид фотоприймача. Так, для лазерів видимого діапазону найбільш чутливими є приймачі на основі зовнішнього фотоефекту - фотоелектронні по-

множувачі (ФЕП). Для лазерів інфрачервоного діапазону неможливо створити фотоприймач з зовнішнім фотоефектом, і для прийому їх випромінювання використовуються напівпровідникові прилади з внутрішнім фотоефектом - фоторезистори і фотодіоди [35].

2.3 Приймачі лазерного випромінювання

Приймачем лазерного випромінювання називають пристрій, призначений для уловлювання, перетворення і обробки випромінюваних лазером сигналів. Приймачі оптичного та радіотехнічного діапазонів хвиль в основному складаються з одних і тих же елементів:

- антени, що представляє собою оптичну систему, що уловлює енергію світлових хвиль;
- безпосередньо приймального пристрою, в якому енергія світлового випромінювання перетворюється в електричну;
- кінцевого пристрою - системи обробки повідомлень, що передаються.

Приймачі лазерного випромінювання в залежності від того, які властивості світла вони використовують при прийомі сигналів, діляться на дві групи:

- приймачі, що використовують при прийомі лазерного випромінювання хвильові властивості світла, зазвичай називають супергетеродинними приймачами;
- приймачі, що реагують на енергію частинок-квантів (фотонів) і називають (за аналогією з детекторними приймачами радіотехнічного діапазону) детекторними приймачами, або приймачами прямого посилення.

Детекторні приймачі оптичного діапазону хвиль діляться на квантові і теплові. Детекторні приймачі перетворюють сигнали лазерного випромінювання в електричні сигнали і здійснюють демодуляцію.

Супергетеродинний приймач перетворює частоту прийнятого світлового сигналу з однієї області частотного діапазону (оптичного) в іншу (радіотехніч-

ну). Перетворення можливо внаслідок змішування сигналу оптичного діапазону хвиль з іншим сигналом даного діапазону, який вирізняється за частотою на невелику (проміжну) частоту. Утвориться проміжна частота при перетворенні повинна бути такою, щоб вона входила в смугу прийому наступних пристроїв, зокрема, в смугу прийому підсилювачів сантиметрового або дециметрового діапазонів хвиль.

Для поліпшення вибірконості приймальних пристроїв зазвичай після антени встановлюють спектральні фільтри. Для збільшення чутливості приймачів лазерного випромінювання використовують підсилювачі оптичного діапазону хвиль, які ставлять після фільтра.

При порівнянні властивостей різних типів приймачів оптичного діапазону хвиль і для правильного вибору детектора використовуються наступні параметри: гранична і інтегральна чутливості приймача, спектральна чутливість детектора, квантова ефективність, питома еквівалентна потужність шумів, постійна часу фотодетектора, частотна характеристика приймача, темновий струм.

Під граничною чутливістю приймача розуміється мінімальна потужність лазерного випромінювання, яка, вступаючи на вхід приймача, створює на його виході сигнал, рівний напрузі шумів. Гранична чутливість приймача вимірюється в частках Ватта або відносною величиною (дБ / Вт). Відношення напруги, що з'являється на опорі навантаження детектора, до потужності лазерного випромінювання, яка вимірюється на вході приймача, визначає інтегральну чутливість приймача [33]:

$$S = \frac{U_c}{P_c} = \frac{eq}{hf} R_n, \text{ в/вт} \quad (2.1)$$

де: U_c - середньоквадратичне напруга сигналу на навантаженні детектора, В;

P_c - потужність випромінювання лазера, виміряна на вході приймача, Вт;

q - квантова ефективність детектору;

h - постійна Планка;

f - частота випромінюваного сигналу, Гц;

R_n - опір, на яке навантажений детектор, Ом;

e - заряд електрону.

Спектральна чутливість детектора є залежність чутливості детектора від частоти лазерного випромінювання, що впливає на даний детектор.

Квантової ефективністю детектора називають відношення частини квантів, що є причиною виникнення фотоелектронів, до загальної кількості квантів, що падають на чутливу поверхню детектора.

Питома еквівалентна потужність шумів. $P_{y\partial}$ - це еквівалентна потужність, віднесена до одиниці площі чутливої поверхні детектора:

$$P_{y\partial} = \frac{P_{ш}}{A} = \frac{P'_c}{\sqrt{\Delta f}} \cdot \frac{U_{ш}}{U_0}, \text{ вт} / \text{см}^2 \text{Гц}^{1/2} \quad (2.2)$$

Де: $P_{ш}$ - еквівалентна потужність шумів, $\text{Вт} / \text{Гц}^{1/2}$;

A - площа чутливого елемента детектора, см^2 ;

P'_c - середньоквадратична величина потужності випромінювання, що падає на одиницю площі чутливого елемента детектора, $\text{Вт} / \text{см}^2$;

Δf - смуга пропускання, Гц;

$U_{ш}$ - середньоквадратичне значення шумів, В.

Еквівалентна потужність шумів визначається виміром відношення сигнал-шум в заданій смузі частот. Залежність напруги, що підводиться до пристрою обробки інформації, від частоти модуляції лазерного випромінювання називається частотною характеристикою приймача. Частотна характеристика показує, наскільки рівномірно проходять модулюючи частоти і який відсоток нелінійних спотворень при цьому створюється.

2.4 Класифікація ФП

За механізмом перетворення енергії фотоперетворювальні пристрої діляться на 3 типи:

- фотоелектричні;
- фотохімічні;
- теплові.

Теплові ФП перетворюють оптичну енергію спочатку в теплову, потім в електричну, фотохімічні - в енергію хімічних реакцій, але для радіофотоніки найбільший інтерес представляють фотоелектричні приймачі, робота яких заснована на внутрішньому і зовнішньому фотоелекті. Зовнішній фотоелектр або фотоелектрична емісія - «вибивання» електронів з поверхні fotocутливого шару під дією падаючого потоку випромінювання, внутрішній фотоелектр - перерозподіл електронів по енергетичним станам в напівпровідниках (н/п) і діелектриках, також обумовлений впливом падаючого потоку випромінювання. В процесі фотоелекту змінюється концентрація носіїв зарядів в середовищі, що призводить до появи фотопровідності і фотогальванічного ефекту:

- фотопровідність - збільшення або зменшення електропровідності провідності речовини за рахунок утворення додаткових носіїв під дією випромінювання оптичного діапазону (На цьому ефекті заснована робота фоторезисторів);
- фотогальванічний ефект - виникнення струму при впливі світла на структурі з вбудованим потенційним бар'єром (фото-ЕРС).

Наприклад у ВОЛЗ завданням фотодетектора є перетворення оптичного випромінювання на вході в електричний струм на виході, згодом отриманий сигнал посилюється і обробляється мікросхемами ФП. для коректної роботи в пристрої необхідно, щоб фотоприймальний модуль достовірно відтворював форму сигналу, що приходить, при цьому не створюючи додаткові шуми.

Ідеальний фотодетектор повинен відповідати наступним вимогам:

- висока чутливість на робочій довжині хвилі;
- широкосмуговість;
- великий динамічний діапазон;
- малий рівень шуму;
- стійкість до змін параметрів навколишнього середовища;

- висока надійність;
- малі габарити;
- довговічність.

Більшості даних вимог відповідають напівпровідникові фотодіоди (ФД). Оптикоелектричне перетворення забезпечує можливість проводити подальшу обробку інформації за допомогою електронних схем, можливості яких визначаються співвідношенням сигнал/шуму на вході електричного тракту, розташованого за фотоприймачем. Напівпровідникові фотоприймачі, як відомо, працюють на двох видах фотоефекту.

На ефекті фотопровідності працюють фоторезистори, на фотогальванічної ефекті - фотодіоди. Крім того, на зовнішньому фотоефекті заснована робота вакуумних фотоелементів - фотоелементів, в яких падає на катод світло викликає емісію електронів.

Фотодіоди, в свою чергу, поділяються на такі:

- PIN-фотодіоди;
- фотодіоди з бар'єром Шотткі;
- гетерофотодіоди;
- лавинні фотодіоди.

Робота фотодіодів заснована на ефекті генерації електроннодірочних пар (ЕДП) при падінні кванта світла $h\nu$ (h - постійна Планка, ν - частота випромінювання) на фоточутливу область. Це обумовлено процесами, що відбуваються в p - n переході, а саме дрейфом основних і неосновних носіїв.

У стані рівноваги по обидві сторони від p - n -переходу існує збіднений шар - шар, в якому бракує вільних носіїв заряду. Для обох областей рівень Фермі знаходиться на одній висоті. Область «дірок» містить в собі акцепторні домішки, на які під дією температури переміщуються електрони з валентної зони, в той час як зона електронної провідності містить донорні рівні, які віддають свої електрони. У зв'язку з наявністю в напівпровіднику внутрішнього електричного поля, в переході підтримується стан рівноваги, це поле утворює потенційний

бар'єр, що перешкоджає дифузії основних носіїв в збіднений шар, також воно визначає струм, що йде через діод. Струм основних носіїв, що володіють достатньою для подолання потенційного бар'єру тепловою енергією, компенсується струмом неосновних носіїв, які, в свою чергу, рухаються через збіднений шар під впливом електричного поля. Процес p - n переходу представлений на рис.2.1.

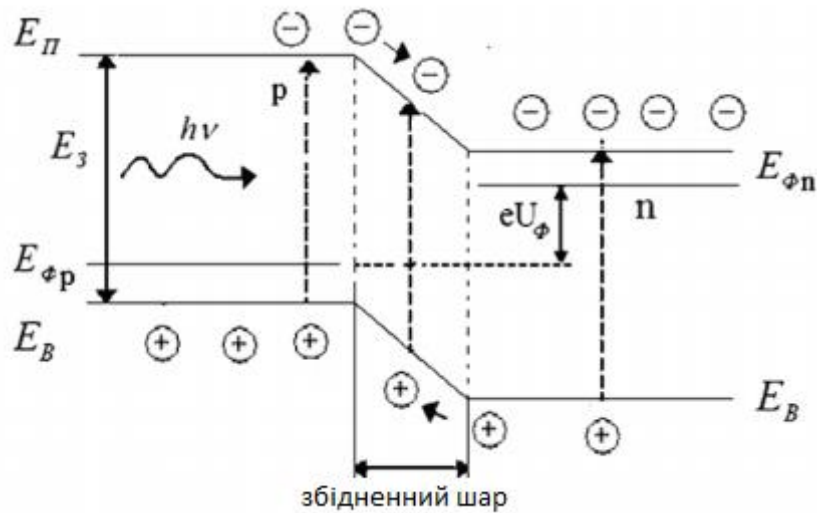


Рисунок 2.1 – - Перехід електронів з валентної зони в зону провідності

При впливі потоку випромінювання в напівпровіднику генеруються пари носіїв електрон-дірка. При цьому в p - і n - областях виникають носії рекомбінуються між собою, зберігаючи рівновагу, а в збідненому шарі носії поділяються: основні носії не можуть перетнути потенційний бар'єр, таким чином, електрони залишаються в n -області, дірки - в p -області, неосновні ж перетинають p - n перехід, їх концентрація зростає, що порушує стан рівноваги, рівні Фермі зміщуються, потенційний бар'єр зменшується.

Недоліком напівпровідникових фотоперетворювачів є недостатньо високе співвідношення сигнал/шум, порівняно з вакуумними фотоелементами.

З цієї причини у лідарних системах найчастіше у якості фотоперетворювача використовуються фотоелектронні помножувачі (ФЕП). Вони не такі зручні у використанні, як фотодіоди, тому що потребують високовольтних джерел

напруги, але мають винятково малі власні шуми, порівняно з величиною сигналу на виході, тому забезпечують високі значення сигнал/шум та великий динамічний діапазон сигналів.

2.5 Принцип дії ФЕП

Фотоелектронний помножувач (ФЕП) - електровакуумний прилад (рис 2.2)[9], в якому потік електронів, що випромінюється фотокатодом під дією оптичного випромінювання (фотострум), посилюється в помножувальній системі в результаті вторинної електронної емісії. Струм в ланцюзі анода (колектора вторинних електронів) значно перевищує початковий фотострум (зазвичай в 10^5 разів і вище) [10].



Рисунок 2.2 – Фотоелектронний помножувач

ФЕП отримує світло через скляне або кварцове вікно (рис 2.2)[9], покрите фоточутливою поверхнею - фотокатодом, який під впливом світла випускає електрони, а вони в свою чергу множаться в спеціальних електродах, що називаються динодами. Зазвичай кількість динодів ФЕП буває від 9 до 13.

Робота динода заснована на ефекті вторинної електронної емісії - явища, коли первинний електрон, потрапляючи на динод, вибиває кілька електронів (званих вторинними). Скільки в середньому з'являється вторинних електронів, залежить і від енергії первинного електрона і від матеріалу динода. Ця величи-

на називається коефіцієнтом вторинної емісії δ і, зазвичай, для сучасних ФЕП лежить в межах від 3 до 10.

Щоб вилетіти з фотокатода фотоелектрон прийшов на 1-ий динод, маючи достатню енергію, потенціал динода повинен бути на кілька десятків або сотень вольт більш позитивним. Аналогічно, щоб з'явилися з 1-ого динода приблизно δ вторинних електронів досягли наступного 2-ої динода, володіючи достатньою енергією, потенціал 2-ої динода також повинен перевищувати потенціал 1-ого на 100-200В. Дуже важливо при цьому, щоб все вторинні електрони потрапили саме на динод, а не на стійки електродів і скло колби [9].

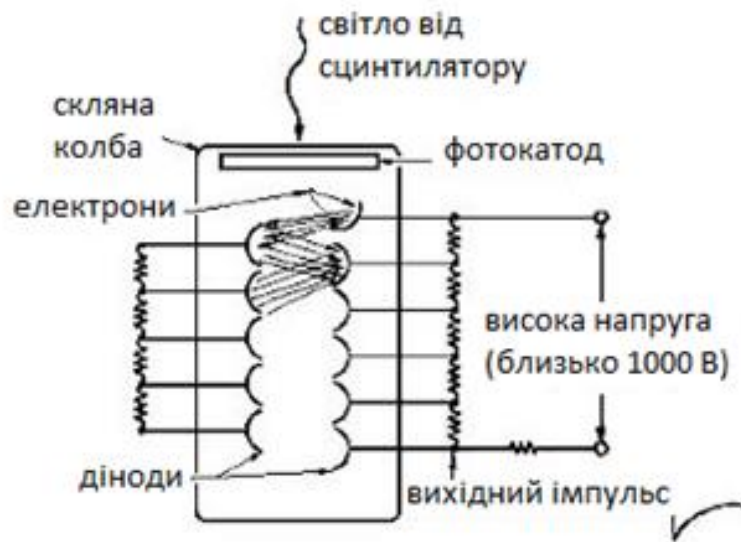


Рисунок 2.2 – Принцип роботи ФЕП

Реальні конструкції динодної систем вельми різноманітні, кожен тип має свої особливості. В кінці динодної системи знаходиться анод або збірний електрод. Як правило, струм, що йде через анод пропорційний фотострумам, що генеруються фотокатодом. Виводи від всіх електродів ФЕП здійснені через основу колби, що поєднана з пластмасовим цоколем. Фотоелектронні помножувачі можуть виробляти сигнал навіть у відсутності світла, тому що існує темновий струм, що виникає через термальну емісію електронів з фотокатода, витік струму між динодами, а також випадкові випромінювання.

Електричний шум також, зазвичай, включається в значення темного струму. Фотоелектронні помножувачі не зберігають заряду і відповідають на зміни вхідних світлових потоків в перебігу декількох наносекунд. Завдяки цьому, ФЕП можуть бути використані для виявлення і запису дуже короткотривалих фотоімпульсів. Характерною особливістю ФЕП, які використовуються в наукових цілях, є високе відношення сигнал/шум при множенні, що сягає величин понад один мільйон. Це пов'язано з тим, що темновий шум може бути істотно знижений завдяки охолодженню фотокатода ФЕП.

ФЕП знайшли широке застосування: у ядерній фізиці як елемент сцинтиляційного лічильника; в пристроях лазерної і телевізійної техніки; в оптичній апаратурі; для реєстрації слабких випромінювань і ін.

2.6 Метод рахунку фотонів

Для лідарних сигналів, що реєструються з великої дальності, характерним є настільки мала їх енергія, що замість реєстрації струму на виході ФЕП використовують так званий режим лічення фотонів. Суть цього методу наступна:

- фотони, що потрапили на фотокатод ФЕП, вибивають електрони, які прискорюються електричним полем і вибивають все більше число електронів з наступних діодів ФЕП (рис. 2.3)[9]. В результаті на виході ФЕП утворюються імпульси струму, число яких пропорційно кількості які потрапили на фотокатод фотонів;

- підраховуючи число імпульсів на виході ФЕП можна визначити світловий потік і інтенсивність падаючого на фотокатод випромінювання.

При кімнатній температурі найбільш істотним є термодісія електронів з фотокатода і діодів. Термодісія обумовлена тим, що розподіл електронів по енергіях при ненульовій температурі не обмежена з боку високих енергій і, з огляду на велику кількість електронів в матеріалі фотокатоду, завжди є елект-

рони, здатні емітувати з фотокатода. Такий електрон не відрізнити від фотоелектрон і також призводить до утворення лавини і появи вихідного сигналу.



Рисунок 2.3 – Ілюстрація принципу дії методу рахунку фотонів

Величина такої термоемісії залежить від властивостей матеріалу фотокатода (ефективні в червоній області спектра фотокатода як правило мають і велику термоемісію), тонкощів технології (наявність домішок) розмірів фотокатода (пропорційна площі) і температури (охолодження на 20°C знижує термоемісію на порядок). Для реальних ФЕП вона може бути від одиниць до багатьох десятків тисяч імпульсів в секунду при звичайній температурі. Термоемісія з динодів має менше значення, оскільки число ступенів множення для таких електронів, що найменше, на 1 менше, і вихідні імпульси в середньому на порядки разів слабкіше. У методі лічення фотонів істотна частина таких імпульсів може бути виключена з подальшої реєстрації шляхом застосування амплітудного дискримінатора. Іншими джерелами темного сигналу (струму) є: розпад радіоактивних атомів в склі колби, космічні промені, автоемісії під дією електричного поля і т.д. Саме флуктуації темного сигналу називаються власним шумом ФЕУ, який обмежує можливість вимірювання слабких світлових потоків.

Іншим важливим ефектом, що викривляє вже лінійну залежність між потоком випромінювання і вихідним сигналом ФЕУ, є нелінійність. Нелінійність властива як методу вимірювання струму, так і методом рахунку фотонів, хоча її причини різні. Для першого методу основним є ефект просторового заряду, що спотворює електричне поле між динодами. При великій освітленості кількість

електронів, що знаходяться одночасно, між останніми динодами таке велике, що їх електричне поле перешкоджає нормальному прискоренню наступних електронів. Отже, коефіцієнт множення ФЕУ зменшується.

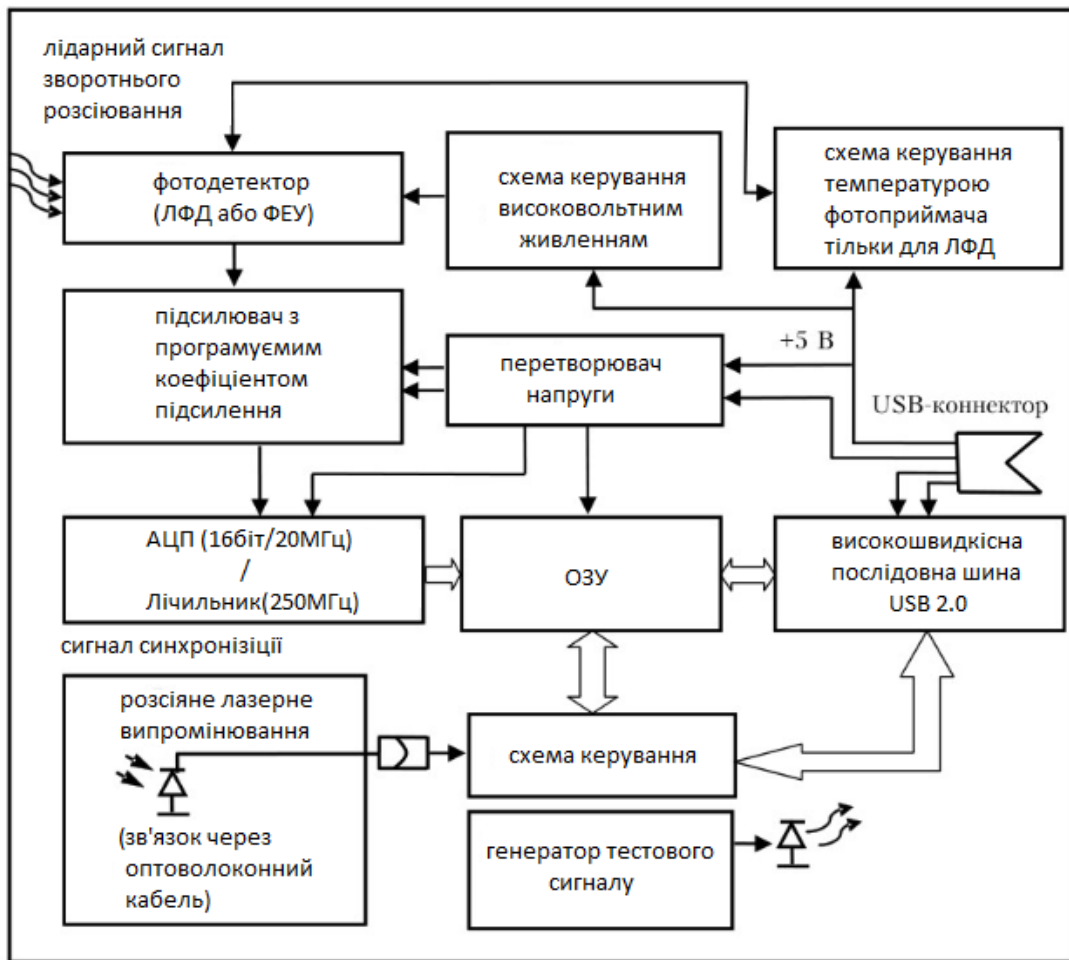
2.7 Сучасні фотоприймальні блоки

В інституті фізики НАН Білорусі розроблений інтегрований фотоприймальний блок на уніфікованих модулях, що забезпечує реєстрацію оптичного лідарного сигналу, його оцифровку і передачу даних в комп'ютер [11]. Основною вимогою до аналогової частини фотоприймального пристрою є здатність роботи в широкому динамічному діапазоні інтенсивності локаційного сигналу, при максимальному падінні різного роду наведень і шумів, перш за все від джерел живлення лазера. Це особливо важливо при реєстрації слабких оптичних сигналів з віддалених ділянок траси зондування. Підсумком розробок стала лінійка моделей фотоприйомних блоків для реєстрації випромінювання в спектральному діапазоні 0.28-1.5 мкм в режимі аналогового сигналу і лічення фотонів (рис.2.4) [12].

Основна ідея розробки полягала в тому, щоб створити функціонально закінчений фотоприймальний блок, в якому містяться всі пристрої, необхідні для реєстрації та оцифровки лідарного сигналу. Передбачалося виключити всі довгі лінії зв'язку між прийомними та реєструючими вузлами приймальної системи лідара, які і є основними приймачами перешкод. В результаті зросте надійність всієї системи і зменшиться її вартість.

До складу модуля (рис 2.4) входять:

- фотодетектор (фотоелектронний помножувач (ФЕП) або лавинний фотодіод (ЛФД) з платою попереднього підсилювача);
- схема управління і джерело високовольтного живлення фотоприймача;



а

Рисунок 2.4 – структурні схеми інтегрованого фотоприймального блоку

- джерело живлення елементів "Пельтьє" для підтримки заданої температури робочої області фотоприймача (тільки для ЛФД);
- підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення;
- аналогово-цифровий перетворювач або лічильник одноелектронних імпульсів;
- оперативна пам'ять типу FIFO;
- конвертор напруги для низьковольтних кіл живлення (вхідна напруга +5 В);
- схема управління (представляє собою програмний код, що завантажується в ПЛІС при кожному включенні);
- генератор тестового сигналу (два послідовних оптичних сигналу від одного джерела з співвідношенням амплітуд приблизно 6:1);
- інтерфейс високошвидкісної універсальної послідовної шини USB 2.0.

В УФ і видимої областях спектра як фотодетекторів, в залежності від призначення, використовуються різні типи аналогових і рахункових ФЕУ, в основному виробництва Hamamatsu, а так само зразки моделей ФЕУ-84, що характеризуються великим струмом анода і забезпечують працездатність приймального каналу при високих фонових засвіченнях інтенсивних локаційних сигналах з ближньої зони, ФЕУ-175 - рахункові фото приймачі з високим коефіцієнтом множення. В ІК діапазоні для реєстрації випромінювання на довжині хвилі 1.06 мкм застосовуються ЛФД модулі типу С30956ЕН-ТС з охолодженням на елементі Плотье, на довжині хвилі 1.5 мкм - ЛФД модулі типу С30659-1550-R2АН. З метою зменшення габаритів лідарної системи фотоприймальні модулі мають функціонально закінчену конструкцію, в якій фотоприймачі, підсилювачі сигналів, а також блоки високовольтного живлення розміщені в одному корпусі.

Аналогова частина фотоприймального модуля (підсилювачі і АЦП) виконані на мікросхемах "Analog Device" (США). Цифрова частина електричної схеми фотоприйомних модулів реалізована на основі ПЛІС CYCLON фірми ALTERA. Цифрові ПЛІС високого ступеня інтеграції мають програмовану користувачем внутрішню структуру і призначені для реалізації складних цифрових пристроїв. Використання ПЛІС і відповідних засобів автоматизації проектування дозволяє в стислі терміни створювати конкурентоспроможні пристрої та системи, що задовольняють вимогам по продуктивності, енергоспоживанню, надійності, габаритним розмірам і вартості.

Для реалізації цифрової частини електричної схеми фотоприймального модуля використана мікросхема EP1C3F144C8 сімейства програмованих логіки CYCLON. Зв'язок з комп'ютером забезпечується за допомогою окремої інтерфейсної мікросхеми CY7C68001LFC фірми CYPRESS. Структурна схема цифрової частини фотоприймального модуля представлена на рис 2.5.

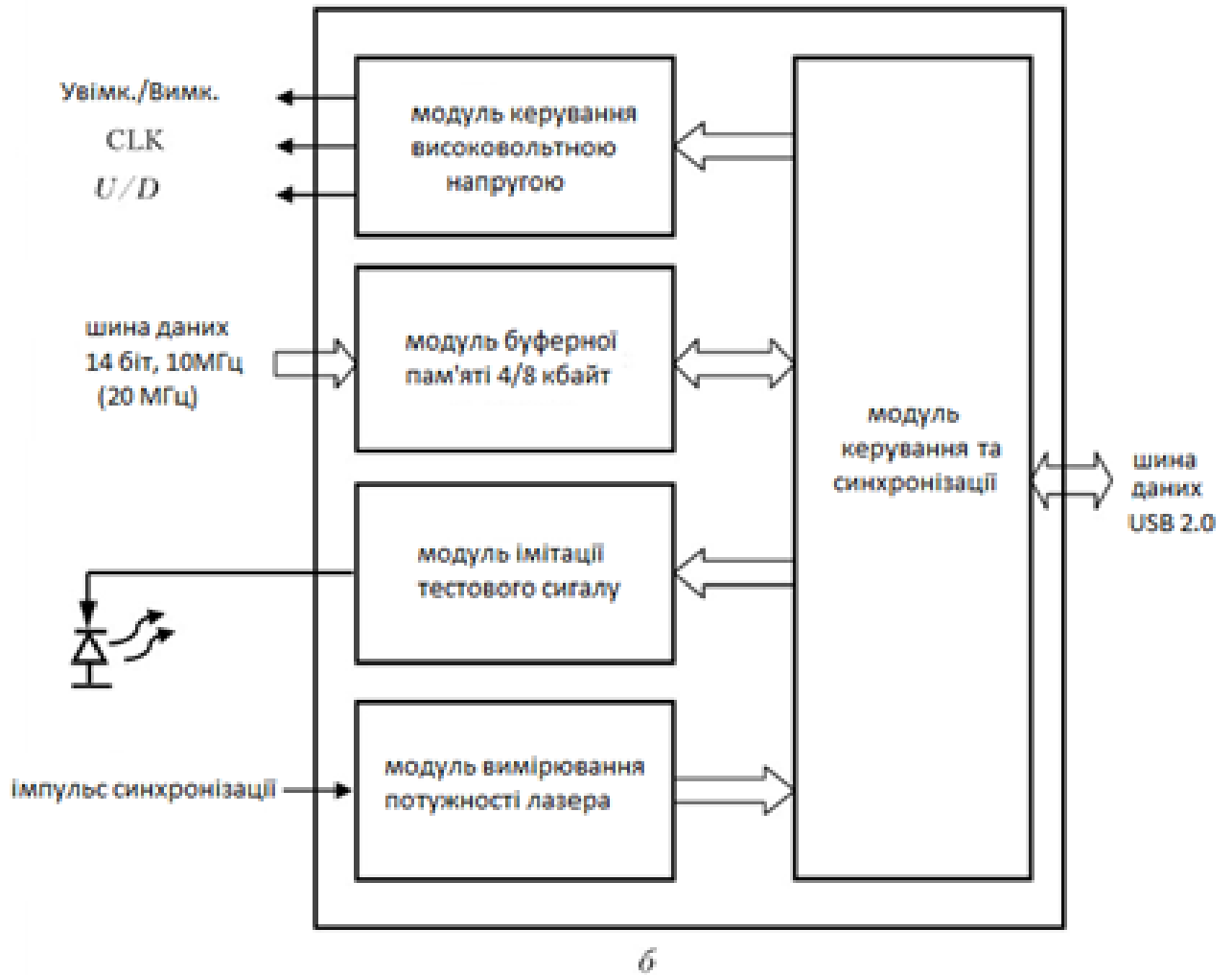


Рисунок 2.5 – структурна схема цифрової частини ФП

На рис 2.6 наведено зовнішній вигляд інтегрованого фотоприймального модуля PRM-01 / C30956EH-TC. Використовується наступне маркування: PRM - Photo Receiving Module, цифри 01 означають аналоговий, 02 - рахунковий режим реєстрації. Заключна комбінація букв і цифр ідентифікує фотоприймач, який використовується в пристрої.



Рисунок 2.6 – Інтегрований фотоприймальний блок

Висновки за розділом:

- лідарах у якості фотоперетворювачів найчастіше використовуються фотоелектронні помножувачі (ФЕП), які мають найменші власні шуми та забезпечують реєстрацію сигналів з великим динамічним діапазоном;
- для реєстрації слабких світлових потоків у приймальній пристрої застосовується режим лічення фотонів;
- для підвищення швидкодії приймача використовуються конструктивні та схемотехнічні методи, зокрема застосування сучасних швидкодіючих ПЛІС у цифровій частині.

3 РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ТА РОЗРАХУНКИ

3.1 Джерела шуму та методи покращення відношення сигнал/шум

При дистанційному зондуванні верхньої атмосфери резонансним лідаром завдяки вкрай незначній потужності сигналу на приймальному пристрої вкрай важливим є питання відношення інформативного сигналу до шуму [38]. Шуми у цьому випадку можуть мати оптичну або теплову природу. Найістотніше впливають на роботу лідарів шуми і завади, які можна розбити на три групи:

- фонові завади атмосфери і зовнішніх джерел;
- шуми приймальної системи;
- дробові шуми сигналу, зумовлені статистичними флуктуаціями фотоемісії.

Потужність потоку фонового випромінювання N , що потрапляє на фотоприймач лідара в момент часу t , дорівнює

$$N(t) = B_{\lambda}(t) A_{ef} \Omega_{\Pi} K_{\Pi} K_C \Delta\lambda_C, \quad (3.1)$$

де $B_{\lambda}(t)$ – спектральна яскравість фонового випромінювання, що залежить від часу доби, довжини хвилі випромінювання, напрямку зондування, місця знаходження фонового випромінювання (Сонце, Місяць, хмари і т. ін.);

Ω_{Π} – тілесний кут поля зору приймальної системи лідара;

K_{Π} і K_C – коефіцієнти пропускання оптичного тракту приймальної системи і спектрального фільтру;

$\Delta\lambda_C$ – смуга пропускання спектрального фільтру. В залежності від умов роботи лідара (денних або нічних) величина B_{λ} може змінюватися на 4...6 порядків.

З аналізу формули 3.1 можна зробити два важливих висновки, щодо зменшення шкідливого впливу фонового випромінювання:

- необхідно зменшувати тілесний кут поля зору приймальної системи і це прийнято називати просторовою фільтрацією сигналу;

- також необхідно зменшувати смугу пропускання спектрального фільтру (спектральна фільтрація сигналу).

Однак зменшення кута зору приймальної системи можливо до тих пір, поки він не зрівняється з кутом розходження лазерного випромінювання. В іншому випадку будемо мати втрату частин сигналу від атмосферного шару, що висвітлюється лазером.

Звуження спектру пропускання фільтру обмежене двома факторами:

- смугою довжин хвиль передавача;
- технологічними можливостями, що мають на сьогоднішній день величини порядку 1 нанометру.

Фонове випромінювання викликає анодний струм фотоелектронного помножувача (ФЕП)

$$I_{\phi}(t) = S_{K\lambda}MN(t), \quad (3.2)$$

де $S_{K\lambda}$ – спектральна чутливість катода; M – коефіцієнт множення діодної системи. Цей струм змінює умови роботи ФЕП. По-перше, за рахунок зсуву робочої точки на світловій характеристиці, зменшуючи тим самим її лінійну ділянку; по-друге, діодні струми що виникають в останніх каскадах ФЕП змінюють розподіл потенціалу на дільнику напруги ФЕП, що призводить до зміни коефіцієнтів множення останніх діодів і, як наслідок, зміни загального коефіцієнта множення M . Вихідний струм ФЕП, окрім складової $I_{\phi}(t)$, що надалі відфільтровується за допомогою розділової ємності, містить шумову складову, середньоквадратичне значення якої дорівнює:

$$i_{\phi}(t) = M \sqrt{2eS_{K\lambda}N(t)\Delta f}. \quad (3.3)$$

Для більшості випадків $N(t)$ можна вважати незмінною за час реєстрації лідарного сигналу.

Аналогічним чином записуються вирази для струму сигналу $I_C(t)$ і його середньоквадратичної складової дробового шуму $i_{CШ}(t)$:

$$I_C(t) = S_{K\lambda} M \Phi(t), \quad (3.4)$$

$$i_{CШ}(t) = M \sqrt{2e S_{K\lambda} N(t) \Delta f}. \quad (3.5)$$

Шуми приймальної системи визначаються власним променистим потоком $\Phi_{ПР}$ від елементів оптичної частини приймальної системи, шумом фотодетектора і теплових шумів на навантажувальному опорі фотодетектора і в електронному підсилювачі. Струми, ініційовані потоком $\Phi_{ПР}$, розраховуються за співвідношеннями, аналогічним (3.4) і (3.5). Однак, для випромінювань у діапазоні довжин хвиль 0,25...1,2 мкм цими шумами можна знехтувати. Для розглянутих режимів роботи лідара теплові шуми навантаження і підсилювача також є незначними. Найбільш істотними є власні шуми ФЕП, які визначаються темновими струмами. Середньоквадратичну складову i_C дробового шуму анодного струму I_{AC} , створювану темновим струмом фотокатода I_{CK} , отримаємо з виразу:

$$i_C = M \sqrt{2e I_{CK} \Delta f} = \sqrt{2e I M I_{AC} \Delta f}. \quad (3.6)$$

Присутність шумового струму ФЕП

$$i_{Ш} = \sqrt{i_{\Phi}^2(t) + i_{CШ}^2(t) + i_C^2(t)} \quad (3.7)$$

обмежує реальну дальність зондування і, відповідно, величину динамічного діапазону лідарного сигналу. Відношення потужностей корисного сигналу і шуму на навантаженні ФЕП визначається зі співвідношення сигнал/шум:

$$D_{SN}(t) = \frac{I_C^2(t)}{I_{Ш}^2(t)}. \quad (3.8)$$

Задаючись певним граничним відношенням сигнал-шум, $D_{SN}(t) \geq 1$, можна визначити максимальну дальність зондування, і, відповідно, динамічний діапазон лідарного сигналу, що підлягає реєстрації.

Проведений аналіз джерел шуму і їхніх проявів у лідарному сигналі дозволяє виділити як основний метод збільшення відношення сигнал/шум – метод спектральної селекції розсіяного «назад» лазерного випромінювання.

3.2 Аналіз граничних можливостей спектральної селекції сигналу

Відомо, що для дослідження складу і домішок атмосфери в діапазоні висот від приземного шару до висот близько 100 км використовуються резонансні лідари. Широке застосування лідарних систем для локації атмосферних домішок вимагає оптимізації основних її компонент. Особливе значення має оптимізація приймальної антени лідара, вага і вартість виготовлення якої пов'язані з площею головного дзеркала телескопа. Параметри приймальної антени в значній мірі визначають характеристики лідара в цілому. Ефективністю роботи лідарної системи може служити величина співвідношення сигнал/шум, яка для режиму лічення фотонів має вигляд[41]:

$$C/Ш = \frac{N_c \cdot (f \tau \gamma)^{1/2}}{[N_c + 2(N_{ш} + N_m \gamma_1 \gamma_2)]^{1/2}}, \quad (3.9)$$

де N_c – кількість сигнальних фотоелектронів;

f – частота повторення імпульсів;

γ_1, γ_2 – ефективності лічення фотоелектронів відповідно шумових і теплових імпульсів (порядка 0,8 - 0,9)%;

$N_{ш}$ – число шумових (фонових) фотоелектронів;

N_m – число фотоелектронів, обумовлених темновим струмом ФЕП.

Кількість сигнальних фотоелектронів відповідно до рівняння лазерної локації (1.1) знаходиться в прямій залежності від енергії передавача і апертури приймального телескопа. Енергія передавача з урахуванням сучасного рівня розвитку квантової електроніки не може бути як завгодно велика. Реально досяжні рівні енергії в смузі випромінювання $\Delta\lambda = 10$ нм для перестроюваних по дов-

жині хвилі лазерів не перевищує кілька джоулів в імпульсі [41]. У зв'язку з цим становить інтерес проаналізувати можливості збільшення співвідношення сигнал/шум шляхом зміни діаметру приймальної антени лідара.

Збільшення діаметра приймальної антени призводить до збільшення числа як сигнальних, так і фонових фотоелектронів. Крім того, збільшення площі дзеркала істотно ускладнює технологію його виготовлення та збільшує вартість приблизно пропорційно кубу діаметру.

Зменшення числа фонових фотоелектронів досягається застосуванням на вході ФЕП інтерференційних фільтрів, особливістю яких є залежність зсуву максимуму смуги пропускання $\Delta\lambda_c$ від апертурного кута проходження променів через фільтр. Для малих кутів α справедливо співвідношення [3]:

$$\Delta\lambda_c = -k\lambda_0\alpha^2 \quad (3.10)$$

де λ_0 – довжина хвилі максимуму смуги пропускання для променів, перпендикулярних до поверхні фільтру;

$k \approx 1,2$ – коефіцієнт, що залежить від структури фільтра;

α – апертурний кут падіння променів.

У припущенні, що аберації приймальної оптики настільки малі що їх можна знехтувати, апертурний кут пов'язаний з параметрами приймальної системи наступним співвідношенням:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{D_{\partial z} \gamma}{D_{\phi}} \right), \quad (3.11)$$

де 2γ – кут зору приймальної оптики;

$D_{\partial z}$ – діаметр головного дзеркала телескопу;

D_{ϕ} – діаметр фільтру.

З (3.10) та (3.11) слідує

$$\Delta\lambda_c = -k\lambda \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{D_{\text{дз}}\gamma}{D_\phi} \right) \right]^2. \quad (3.12)$$

За допомогою рівняння (3.12) можна визначити мінімальну ширину смуги пропускання фільтра $\Delta\lambda_\phi$, який може бути застосований в поєднанні з дзеркалом даного діаметра приймального телескопа. Очевидно, що повинна також виконуватися умова

$$\Delta\lambda_\phi \geq \Delta\lambda_c. \quad (3.13)$$

Діаметр фільтрів, зазвичай, не перевищує 40мм, по-перше завдяки технологічним обмеженням, а також тому що їх вартість росте квадратично по відношенню до діаметру.

На рисунку 3.1 представлені графіки залежності смуги пропускання фільтру від діаметру головного дзеркала при різних діаметрах селективних фільтрів, які отримані з використанням формули 3.12. Кут зору приймального телескопу дорівнював $2\gamma = 2$ мрад, що відповідає більшості резонансних лідарів, які використовуються для нічних та сумеречних спостережень.

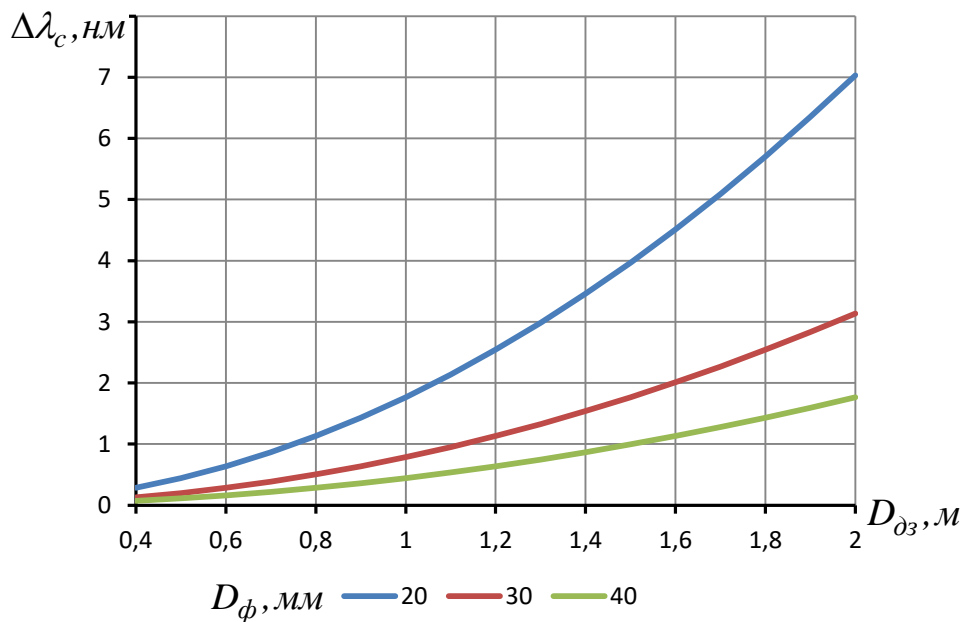


Рисунок 3.1 – Залежність смуги пропускання фільтру від діаметру головного дзеркала при різних діаметрах фільтрів

З рисунка 3.1 випливає, що при технологічній межі смуги пропускання фільтру, що дорівнює 1 нм, нема сенсу підвищувати діаметр головного дзеркала біль ніж 1,5 навіть при достатньо великому діаметру фільтру 40мм.

На рис. 3.2 представлені графіки залежності смуги пропускання фільтру від діаметру дзеркала при різних величинах кута зору приймальної оптики для нічних спостережень ($2\gamma = 2$ мрад) і для денних ($2\gamma = 0,5$ мрад).

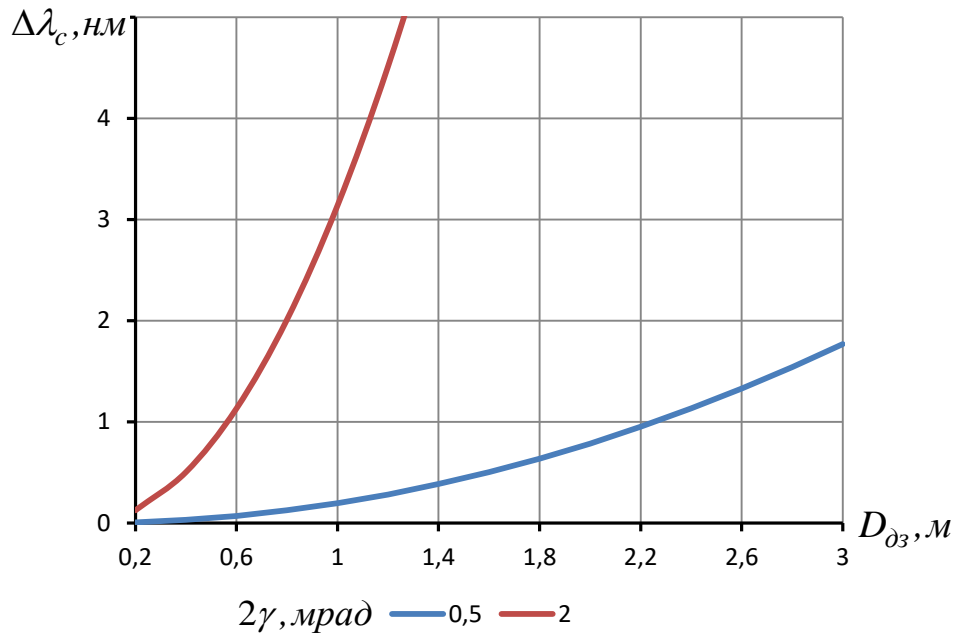


Рисунок 3.2 – Залежність смуги пропускання фільтру від діаметру головного дзеркала при різних кутах зору приймача

З графіків рис. 3.2 можна зробити висновок, що при вищевказаній технологічній межі 1 нм максимальний діаметр дзеркала для нічних спостережень не повинен перевищувати 0,6 м, а для денних — 2,2 м. В іншому випадку, збільшення діаметру головного дзеркала не підвищить рівень сигналу на приймальному пристрої, оскільки зростання площі головного дзеркала буде компенсуватися погіршенням пропускання фільтру.

3.3 Захист ФЕП від перевантаження

3.3.1 Особливості роботи ФЕП у широкому динамічному діапазоні сигналів та порівняльний аналіз методів захисту ФЕП від перевантажень

Відбиті сигнали лідара сприймаються першим елементом приймальної частини - фотоелектронним помножувачем (ФЕП). Конструктивно лідар виконаний так, що для передавача і приймача використовується одне й те ж дзеркало, і коли посилається потужний імпульс передавача, то на ФЕП потрапляє сильний світловий імпульс. Кількісні оцінки, виконані у рамках цієї роботи з використанням лідарного рівняння (1.1) показують, вже для висот близько 15 км при типовій енергії випромінювання лазера 1 Дж середня частота фотонів на приймачі сягає граничної величини 100 МГц для сучасних ФЕП. При подальшому зростанні світлового потоку з менших висот перетворювальна характеристика ФЕП стає нелінійною.

Необхідно також взяти до уваги, що чутливість ФЕП настільки висока, що під дією таких потужних світлових імпульсів він виходить з ладу («засліплюється») та втрачає здатність до роботи на неприпустимо великий час. Необхідно закрити шлях проходження потужного світлового сигналу лазера на катод ФЕП, як в момент випромінювання зондуєчого імпульсу, так і протягом часу, поки відбиті сигнали сильні. Після цього ФЕП повинен бути відкритий для прийому більш слабких сигналів. Сильний сигнал з висот до 15 км зумовлений відбиттям, в основному, від аерозольних складових. Якщо відбитого сигналу буде вище деякого рівня, то чутливість ФЕП різко погіршується на час до одиниць секунд. Внаслідок цього, необхідно запобігти попаданню потужного світлового сигналу лазера на катод ФЕП, як в момент випромінювання зондуєчого сигналу, так в плинні часу відповідного зондування висот 15-20 кілометрів.

Існують різні способи захисту ФЕП. В даний час використовуються пасивні затвори, у яких коефіцієнт пропускання залежить від величини прикладеної напруги. Однак в проясненому стані вони володіють низьким коефіцієнтом

пропускання, а в закритому, навпаки мають неприпустимо високе пропускання. Використовуються так само і поляризаційні світлофільтри.

Конструктивно завдання захисту інколи вирішується помірним рознесенням приймальних і передавальних телескопів. Однак за рахунок багатократного розсіювання з нижніх висот атмосфери останній спосіб є малоефективним.

Пристроєм, що найкращим чином забезпечує захист ФЕП від перевантаження, є механічний затвор-обтюратор, що перекриває фотокатод ФЕП на час дії потужного світлового випромінювання.

3.3.2 Розрахунок обтюратору

Обтюратор являє собою пропелер, що обертається електромотором, і закриває на певний час лопатями фотокатод ФЕП. Швидкість обертання обтюратору і розміри лопатей визначаються часом необхідного закриття ФЕП і діаметром світлочутливої частини катода. Очевидно, що в момент, коли лопать почала закривати катод ФЕП, необхідно подати імпульс запуску на лазер. Для цього використовується фотодіод, який виробляє сигнал, коли лопать перериває потік світла від світлодіода безперервного випромінювання, що розташований навпроти (рис. 3.3).

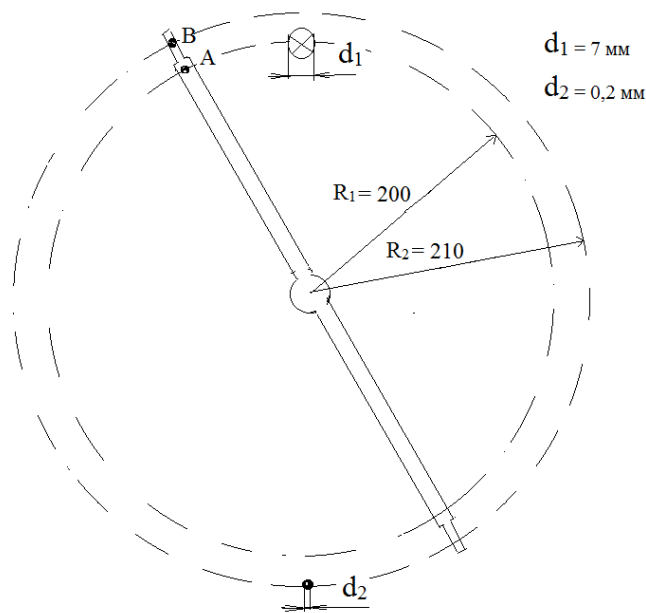


Рисунок 3.3 – Схематичне пояснення принципу дії обтюратору

Цей вузол оптопара розташований діаметрально протилежно по відношенню до ФЕП, і переривається світловий потік іншим плечем обтюратора.

Сигнали, одержувані на фотодіоді, будуть слабкими і їх необхідно підсилити до величини достатньої для роботи подальших каскадів. Після посилення сигнали надходять на схему збігів, призначеної для точного підстроювання часу запуску лазера по відношенню до моменту початку закриття ФЕП.

Груба підстройка здійснюється зміною місця розташування оптопари щодо місця розташування ФЕП, точна – електронним регулюванням затримки моменту включення лазера. З конструктивних міркувань фотодіод встановлюється таким чином, що при обертанні пропелера перекриття фотокатода ФЕП надходить пізніше, ніж перекриття фотодіода.

Вихідними даними до розрахунку обтюратора є діаметр світло-чутливої частини катода ФЕП (наприклад, для відомого ФЕП-128 $d = 7$ мм), і захисний час t_3 на який повинен бути закритий ФЕП. Необхідно щоб ФЕП приймав сигнал відбитий з висот 20 - 25 кілометрів і вище. Візьмемо висоту ближче до нижньої межі (20 кілометри), тому, що з-за великого діаметру катода ФЕП перекриття світлочутливої поверхні в залежності від часу має трапецеїдальну форму (див. рис. 3.4).

Очевидно, що запуск лазера повинен проводитися в момент часу t_1 , так як до цього моменту ФЕП в повному обсязі закритий. Тому $t_3 = \tau_2$. Висоті H відповідає час закриття:

$$t_3 = \frac{2H}{c}; \quad (3.14)$$

де c – швидкість поширення світлового імпульсу.

Для висоти $H = 20$ км маємо:

$$t_3 = \frac{2 \cdot 20 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} = 133 \cdot 10^{-6} = 133 \text{ (мкс)};$$

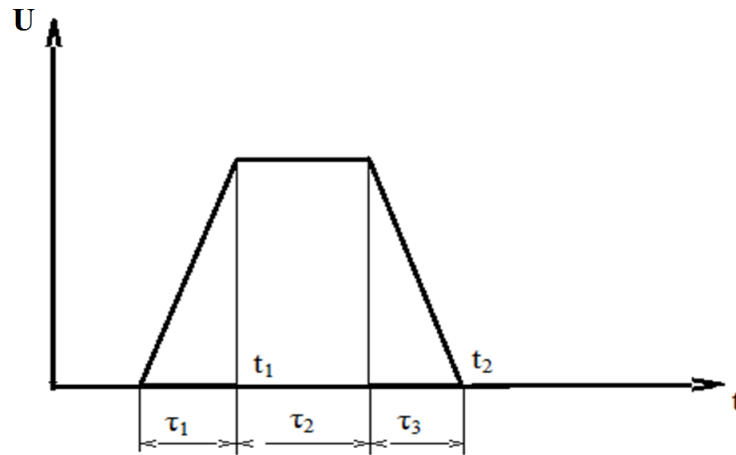


Рисунок 3.4 – Часова діаграма сигналу при перекритті фотокатода ФЕП

Виходячи з відомого часу t_3 , вибираємо електродвигун обтюратора зі швидкістю обертання $n = 3000$ об/мин. Це однофазовий двигун на змінній напрузі 220 вольт. Приймавши величину радіуса $R = 200$ міліметрів (див. рис 3.3) визначаємо необхідна ширину лопаті обтюратора.

Візьмемо до уваги швидкість обертання електродвигуна:

$$n = 3000 \text{ об/хв} = 50 \text{ об/с.}$$

До катода ФЕП лопаті обтюратора підходять по черзі через проміжок часу:

$$\frac{T}{2} = \frac{1}{2n} = \frac{1}{2 \cdot 50} = 10^{-2} \text{ (с)} = 10 \text{ (мс);} \quad (3.15)$$

Лінійна швидкість руху точки А (рис.3.3):

$$v = \frac{2\pi R_1 \cdot 50}{t} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 200 \cdot 50}{1} = 62832 \text{ (мм/с);} \quad (3.16)$$

Тоді необхідна ширина лопаті пропелера знаходиться як:

$$S = v \cdot t_3, \quad (3.17)$$

де S – ширина лопаті пропелера;

t_3 – час закриття фотокатода.

$$S = 62832 * 133 * 10^{-6} = 8 \text{ (мм)};$$

Час неповного закриття фотокатода ФЕП (τ_1 і τ_1 на рис. 3.4):

$$t_{\text{нз}} = \frac{d_1}{v}; \quad (3.18)$$

$$t_{\text{нз}} = \frac{7}{62832} = 0,0001114 \text{ с} = 111,4 \text{ (мкс)};$$

Перекриття світлочутливої поверхні фотодіода матиме таку ж форму як і у фотокатода ФЕП. Лінійна швидкість руху точки В:

$$v = \frac{2\pi R_2 * 50}{t} = \frac{2 * 3,14 * 210 * 50}{1} = 65973,44 \text{ (мм/с)}; \quad (3.19)$$

Тривалість імпульсу фотодіода приймаємо рівною 50 мікросекунд. Тоді ширина лопаті пропелера в точці В:

$$S = 65973,44 * 50 * 10^{-6} = 3,2 \text{ (мм)}; \quad (3.20)$$

Час неповного закриття фотодіода:

$$t_{\text{нзфд}} = \frac{d_2}{v}; \quad (3.21)$$

де d_2 – діаметр світлочутливої частини світлодіода.

$$t_{\text{нзфд}} = \frac{0,2}{65973,44} = 0,000003 \text{ (с)} = 3 \text{ (мкс)}.$$

Висновки за розділом:

- для підвищення відношення сигнал/шум в резонансних лідарах необхідно застосовувати просторову та спектральну селекцію сигналу;
- розрахунки, отримані в розділі, свідчать про безперспективність збільшення діаметрів головного дзеркала більш ніж 0,6 м для нічних спостережень і 2,2 м – для денних;
- найкращим засобом захисту ФЕП від перевантажень є механічний об'єкторатор, конструктивний розрахунок якого проведений у даному розділі.

ВИСНОВКИ

За результатами проведеного в атестаційній роботі аналізу та розрахунків можна зробити наступні висновки:

- лідарні системи є ефективними інструментами для безконтактного дистанційного контролю навколишнього середовища;
- для реєстрації слабких світлових потоків у приймальному пристрої доцільно використовувати режим лічення фотонів;
- для підвищення швидкодії приймача необхідно використовувати конструктивні та схемотехнічні методи, зокрема застосування сучасних швидкодіючих ПЛІС у цифровій частині;
- розрахунки, отримані в роботі, свідчать про безперспективність збільшення діаметрів головного дзеркала більш ніж 0,6 м для нічних спостережень і 2,2 м – для денних;
- найкращим засобом захисту ФЕП від перевантажень є механічний обтюратор, конструктивний розрахунок якого проведений в атестаційній роботі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Википедия [Електронний ресурс] / Лидар – Режим доступу:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Лидар> (Дата звернення: 18.11.20)
2. Studbooks [Електронний ресурс] / Принцип действия лидара – Режим доступу:
https://studbooks.net/2128812/matematika_himiya_fizika/printsip_deystviya_lidara
(Дата звернення: 18.11.20)
3. Arcgis [Електронний ресурс] / Что представляют собой данные лазерной съемки – Режим доступу: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm> (Дата звернення: 18.11.20)
4. І. В. Васильківський, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Екологія та екологічна кібернетика
5. Habr [Електронний ресурс] / Как десяток ведущих компаний пытаются создать мощный и недорогой лидар – Режим доступу:
<https://habr.com/ru/post/441706/> (Дата звернення: 21.11.20)
6. Буданов П.Ф., Буданов М.П., Демідов Б.О., Системи озброєння і військова техніка.
7. Захаров В. М., Костко О. К., Метеорогоическая лазерная локация
8. Laserportal [Електронний ресурс] / Флуоресцентный лидар – Режим доступу:
http://www.laserportal.ru/content_1003 (Дата звернення: 22.11.20)
9. Azimp [Електронний ресурс] / Тематические статьи по фотонике – Режим доступу: <http://www.azimp.ru/articles/tech/105/> (Дата звернення: 22.11.20)
10. Шендрик Р. Ю., Раджабов Е. А., введение в физику сцинтилляторов – 2
11. Studbooks [Електронний ресурс] / Фотоприемник для счета фотонов – Режим доступу:

https://studbooks.net/2135447/matematika_himiya_fizika/fotopriemnik_scheta_foton_ov (Дата звернення: 23.11.20)

12. Слесарь А. С., Чайковский А. П., Пеннер И. Э., Фотоприёмные модули для лидарных станций в сети CIS-LiNet
13. Монин А.С. Некоторые особенности рассеяния звука в турбулентной атмосфере. Акустич. журн. 1961. Т. VII. Вып.4. С. 457-461.
14. Зуев В.Е., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы. Томск: «ООО изд. «Раско», 2002. 352 с
15. Weitkamp C. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere. Springer series in optical sciences. 2005. V. 102. 456 p
16. Chanin M.L., Garnier A. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere // Geophys. Re. Lett. 1989. V. 16. P. 1273-1276.
17. Rees D., Nelke G., Fricke K.-H., Lloyd N.D. The Doppler wind and temperature system of Alomar lidar // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. P. 1827-1842.
18. Rees D., McDermid I.S. Doppler lidar atmospheric wind sensor: Reevaluation of a 355-nm incoherent Doppler lidar // Applied Optics. 1990. V. 29. P. 4133-4157.
19. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Лазерное гетеродинамирование. М.: Наука. 1985. 288с.
20. Frehlich R.G. Conditions for optimal performance of monostatic coherent laser radar // Optics Letter. 1990. V. 15. P. 643-645.
21. Frehlich R.G., Kavaya M.J. Coherent laser radar performance for general atmospheric turbulence // Applied Optics. 1991. V. 30. P. 5325-5337
22. Zhao Y., Post M.J., Hardesty R.M. Receiving efficiency of Monostatic pulsed coherent Lidars. 1: Theory // Applied Optics. 1990. V. 29. N 28. P. 4111-4119.
23. Lawrence T.R., Wilson D.J., Craven C.E., Jones I.P., Huffaker R.M., Thomson J.A.L. A laser velocimeter for remote wind sensing // The Review of Scientific Instruments. 1972. V. 43. N 3. P. 512-518.

24. Sonnenschein C.M., Horrigan F.A. Signal-to-noise relationship for coaxial systems that heterodyne backscatter from the atmosphere // *Applied Optics*. 1971. V. 10. N 7. P. 1600-1604.
25. Köpp F., Schwiesow R.L., Werner Ch. Remote measurements of boundary layer wind profiles using a cw Doppler lidar // *Journal of Climate Applied Meteorology*. 1984. V.23. N1. P. 148-158
26. Barth, M., Chadvik,R., Van de Kamp, D., Data processing algorithms, used by NOAA's wind profiler demonstration network, *Ann. Geophys.*, 12,518-528, 1994.
27. Ch., Köpp F., Schwiesow R.L. Influence of clouds and fog on LDA wind measurements // *Applied Optics*. 1984. V. 23. P. 2482-2487.
28. Smalikho I. N. Techniques of wind vector estimation from data measured with a scanning coherent Doppler lidar // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2003. V. 20. N2. P. 276-291.
29. Hall F. F., Huffaker R. M., Hardesty R. M., Jackson M. E., Lawrence T. R., Post M. J., Richter R. A., Weber B. F. Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar // *Applied Optics*. 1984. V. 23. N 15. P. 2503-2506.
30. Gordienko V.M., Kormakov A.A., Kosovsky L. A., Kurochkin N. N. Pogosov G.A., Priezzhev A.V., Putivskii Y.Y. Coherent CO₂lidars for measuring wind velocity and atmospheric turbulence // *Optical Engineering*. 1994. V. 33. N 10. P. 3206-3213.
- 301 Reitebuch O., Werner Ch., Leike I., Delville P., Flamant P.H., Cress A., Engelbart D. Experimental Validation of Wind Profiling Performed by the Airborne 10-m Heterodyne Doppler Lidar WIND // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2001. V.18. N 8. P.1331-1344.
32. Henderson S.W., Hale C.P., Magee J.R., Kavaya M.J., Huffaker A.V. Eye-safecoherentlaserradarsystemat 2-musingTm. Ho: YAG lasers // *Optics Letters*. 1991. V. 16. P. 773–775.
33. Henderson S.W., Suni P.J.M., Hale C.P., Hannon S.M., Magee J.R., Bruns D.L.,

- Yuen E.H. Coherentlaserradarat 2-musingsolid-statelasers // IEEETrans. Geosci. Remote Sens. 1993. V. 31. N 1. P. 4–15.
34. Geospace [Электронный ресурс] / Проведение лидарных измерений – Режим доступа: <http://ipg.geospace.ru/top-atmosphere.html> (Дата звернення: 25.11.20)
35. Teh-lib [Электронный ресурс] / Фотоприемные устройства – Режим доступа: <http://www.teh-lib.ru/koe/fotopriemnie-ustroystva.html> (Дата звернення: 25.11.20)
36. Ю. Ф. Аршинов / КР-лидар для дистанционного контроля промышленных загрязнений атмосферы
37. 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.
38. 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.
39. Петрук В. Г. / Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ (теорія і практика оптичного вимірювального контролю): монографія (Ч. II). / В. Г. Петрук. — Вінниця: Універсум-Вінниця, 2000. — 207 с.
40. Иванов В. И. / Многофункциональные лидарные системы / В. И. Иванов, И. А. Малевич, А. П. Чайковский. — Мн: Университетское, 1996. — 286 с.
41. Зарудный А.А., Лагутин М.Ф., Кузьменко В.Н., Тулинов Г.Ф. Резонансные лидары в глобальном мониторинге примесей верхней атмосферы. Прикладная радиоэлектроника. 2004.-№1. С.16-28.