

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.XXXXXXX.001 ПЗ

Вплив геометричного фактору на точність виміру щільності атмосфери лідаром
(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи РПСКМ-19-1
Леонтєв О.О.
(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

Леонтьєв О.О.

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 Леонтьєву Олександрю Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вплив геометричного фактору на точність виміру щільності атмосфери лідаром ібір 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

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: 71 сторінки тексту, 9 рисунків, 1 таблицю, 21 джерел та 2 додатка

АТМОСФЕРА, 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 проведено аналіз систем лідарного зондування атмосферного середовища.

Аналізується можливість відновлення висотного профілю щільності атмосфери за даними лідарного зондування з урахуванням геометричного фактору.

ABSTRACT

The master's degree work consists of an explanatory note containing: 71 pages of text, 9 figures, 1 table, 21 sources and 2 appendices.

ATMOSPHERE, 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 reconstructing the density profile of the atmosphere from the data of lidar sounding taking into account the geometric factor is analyzed.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 Огляд лідарних технологій дослідження навколишнього середовища	10
1.1 Дистанційне лазерне зондування	10
1.1.1 Взаємодія лазерного випромінювання з атмосферою	10
1.1.2 Види розсіювання	10
1.1.3 Застосування лазерів для зондування атмосфери	12
1.1.4 Принцип роботи лідару і характеристики лідарного методу з використанням спонтанного комбінаційного розсіювання	13
1.1.5 Лідари, призначені для дослідження атмосфери (метрологічні лідари)	17
1.1.6 Основні елементи МЛ	18
1.2 Приклади схем лідарів	19
2 Аналіз метеорологічних лідарних систем	22
2.1. Аналіз лідарних методів дослідження атмосфери	22
2.2 Системна класифікація метеорологічних лідаров	26
2.3 Аналіз хвильових процесів в атмосфері	32
2.4 Аналіз технічних засобів вимірювання параметрів ВГХ	34
2.5 Аналіз структури метеорологічних лідаров і вхідних сигналів приймальних систем	36
2.6 Одноелектронні характеристики фотоелектронні помножувачів (ФЕП)	43
2.6.1 Джерела шумів ФЕП	43
2.6.2 Порівняльні характеристики ФЕП	44
3 Результати аналізу та розрахунки	48
3.1 Структурна схема лідару	48

3.2 Вплив геометричного фактору на точність визначення щільності нижніх шарів атмосфери	52
ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	60
ДОДАТОК А	63
ДОДАТОК Б	70

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

РСКР – резонансне спонтанне комбінаційне розсіювання

СКР – спонтанне комбінаційне розсіювання

ФЕП – фотоелектронний помножувач

ОКГ – оптичний квантовий генератор

МЛ – метеорологічний лідар

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

ВГХ – вторинні гравітаційні хвилі

ВСТУП

Успішний розвиток більшості галузей економіки залежить від оптимальних умов взаємодії людини з навколишнім повітряним середовищем. Знання основних параметрів атмосфери, їх динаміки і перспективне прогнозування створюють ефективні умови господарської діяльності і дозволяють уникнути при цьому великих матеріальних втрат. З іншого боку активну антропогенний вплив на навколишнє повітряне середовище може негативно позначитися на розвитку економіки і порушити екологічну рівновагу біосфери Землі.

Одним з важливих динамічних параметрів атмосфери є постійно існуючі хвилеподібні неоднорідності щільності і складу нейтральних і іонізованих компонентів. Ці хвилі, поширюючись на великі відстані, захоплюють часом всю атмосферу, що дозволяє дистанційно контролювати в глобальному масштабі потужні енергетичні впливи на повітряне середовище.

Актуальність теми визначається необхідністю розширення можливостей технічних засобів вивчення параметрів атмосфери для вирішення завдань довгострокового прогнозування погоди, контролю активних впливів на атмосферу і вивчення динамічних процесів повітряного басейну.

Переваги лідарного методу зондування в порівнянні з відомими технічними засобами контролю параметрів атмосфери проявляються в можливості дистанційного вимірювання практично всіх метеорологічних параметрів до висот 100 кілометрів і вище, високому просторовому вирішенні, мобільності лідарних систем і значне скорочення матеріальних витрат у порівнянні з балонним і ракетним методами зондування атмосфери.

Найбільш широко застосовуються лідарні системи для вимірювання стандартних метеорологічних параметрів до висот 5 - 10 кілометрів. Однак значний інтерес для довготривалого прогнозування погоди, вивчення динамічного стану атмосфери, оцінки ролі Сонячно-Земних зв'язків представляють лі-

дарні дистанційні методи вивчення параметрів страти-мезосфери і нижньої термосфери.

Основні недоліки наземних висотних лідаров, пов'язані з екрануючим впливом хмарності і обмеженими можливостями просторового огляду, можуть бути усунені при установці лідара на літак або космічний літальний апарат. Це дозволяє оперативно виміряти параметри атмосфери і контролювати активні антропогенний вплив на повітряне середовище на більшій території Земної кулі.

Основні завдання, що виникають при проектуванні метеорологічних лідарних систем, полягають у наступному:

1. Розробка загальносистемних питань проектування.
2. Розробка принципів побудови автоматизованих систем обробки лідарного сигналу.
3. Оптимізація алгоритмів обробки результатів вимірювань з метою розрахунку метеопараметрів.

В даний час ці завдання найбільш широко досліджуються з метою розробки і створення лідарних систем для вивчення параметрів стежка і стратосфери до висот 5 - 20 км.

Створення метеорологічних лідаров для дослідження мезотермосфери визначає необхідність вирішення зазначених завдань на якісно новому рівні.

Ці завдання мають велике наукове і народногосподарське значення.

Метою магістерської роботи є: підвищення ефективності роботи приймального пристрою лідара.

Для цього у магістерській роботі вирішувались наступні завдання:

- огляд лідарних технологій дослідження навколишнього середовища;
- огляд методів та варіантів побудови апаратури для лідарних досліджень атмосфери;
- аналіз впливу геометричного фактору на точність визначення щільності атмосфери на нижніх висотах.

1 ОГЛЯД ЛІДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Дистанційне лазерне зондування

1.1.1 Взаємодія лазерного випромінювання з атмосферою

Визначення характеристик атмосфери методом лазерного зондування засноване на ефектах взаємодії електромагнітної світлової хвилі з досліджуваним шаром повітря. Ці явища відомі порівняно давно і частково використовувалися для атмосфери в оптичному діапазоні спектра. До числа таких досліджень відносяться прожекторне зондування і вивчення розсіювання і поглинання сонячного світла в земній атмосфері або в штучних натрієвих хмарах, що закидаються в верхню атмосферу ракетами.

Основна і найбільш важке завдання, що стоїть на шляху локаційних методів метеорологічних лазерних вимірювань, полягає в тому, щоб розділити при прийомі сигналів і їх подальшій обробці одночасно проявляються ефекти взаємодії лазерного випромінювання з середовищем. Це ефекти, що представляють собою розсіювання випромінювання, поглинання і вимушене випромінювання. Вимушене випромінювання не несе ніякої проблеми, а ось поглинання і розсіювання (особливо розсіювання) створюють проблеми прийому інформації.

1.1.2 Види розсіювання

Для отримання комплексних відомостей про параметри атмосфери застосовуються безконтактні методи лазерної дистанційної спектроскопії, засновані, зокрема, на спонтанному комбінаційному розсіянні. Лазерна дистанційна спектроскопія дозволяє досліджувати питання фізики і складу атмосфери в зв'язку з проблемами метеорології і аеродинаміки, а також боротьбою за чистоту навколишнього середовища, вимірювання температури атмосфери, океану, якісного і кількісного аналізу плазми, пламен, стеження за ходом хімічних реакцій. Інформація про концентрацію досліджуваних компонентів витягується з спостереження взаємодії лазерного випромінювання з атмосферою.

Розсіювання оптичних хвиль в залежності від типу розсіювачів і відношення їх розмірів з довжиною хвилі зазвичай підрозділяється на три види: розсіювання Мі, релєєвське і комбінаційний розсіювання світла [1].

Розсіювання Мі це класичне пружне розсіяння, що відбувається на довжині хвилі падаючого випромінювання, коли розміри розсіюють частинок можна порівняти з довжиною хвилі оптичного випромінювання або більше її. При цьому розсіюється світло сконцентрований в основному в напрямку «вперед» і має значно меншу інтенсивність в напрямку «назад».

Релєєвське розсіювання також не когерентно і відбувається без скільки-небудь значного обміну енергією з внутрішніми станами молекул або атомів. Енергія релєєвського розсіювання зосереджена поблизу напрямку поширення пучка з рівними інтенсивностями розсіювання «вперед» і «назад». Релєєвське розсіювання використовується для дослідження турбулентності атмосфери, флуктуацій щільності в дифузійних пламенах і визначення видів молекул в турбулентному потоці.

Процес спонтанного комбінаційного розсіювання включає обмін значними кількостями енергії між розсіяним фотоном і молекулою. Внаслідок цього спектральні компоненти комбінаційного розсіювання зрушені щодо частоти падаючого випромінювання на частотні інтервали, рівні інтервалам між рівнями енергії молекул. Перетин комбінаційного розсіювання зазвичай менше перетину релєєвського розсіювання приблизно на три порядки. Комбінаційне розсіювання використовується не тільки для отримання інформації про молекулярну структуру, але і для вимірювань щільності, температури і концентрації забруднень в повітрі.

Існує також вид розсіювання, відомий як резонансне розсіювання.

Під резонансним розсіюванням зазвичай розуміється розсіювання, при якому частота випромінювання, що падає на атомну або молекулярну систему, дорівнює або близька до однієї з частот їх власних електронних переходів. Резонансне розсіювання може спостерігатися і на частотах молекул в інфрачервоній області спектра. Однак тут існують труднощі інтерпретації вимірю-

вань, обумовлена перекриттям окремих смуг, які часто мають значну спектральну ширину. Резонансне розсіювання, зокрема, виникає при поширенні випромінювання через атмосферу землі.

Флуоресценцією називається спонтанне випускання фотона атомом або молекулою після переходу їх в збуджений стан при поглинанні падаючого випромінювання з частотою ν_0 , що лежить в межах окремої лінії або смуги поглинання. Якщо збуджені атоми або молекули мають зіткнення, що призводять до перерозподілу їх по іншим збудженим рівням в результаті безвипромінювальних переходів, то спостерігається широкосмугова флуоресценція, що має майже безперервний спектр. Використання флуоресценції завжди вимагає перебудованих джерел когерентного оптичного випромінювання для налаштування їх на резонансні частоти досліджуваних молекул або атомів.

Флуоресценція є послідовністю двох однофотонних процесів, тобто двоступінчастою взаємодією, що складається в поглинанні окремого фотона частоти ν_0 з подальшим спонтанним випусканням фотонів частоти ν_r . Інтенсивність флуоресценції загасає експоненційно.

1.1.3 Застосування лазерів для зондування атмосфери

Для точного прогнозу погоди атмосферу зондують за допомогою лазера. Зондування відбувається наступним чином: посиляється імпульс лазерного випромінювання в атмосферу з деякою тривалістю і повертається на приймач, після просвічування атмосфери, з інформацією про склад атмосфери, атмосферному тиску і щільності.

Частота повторення імпульсів випромінювання лазера має важливе значення при вивченні динаміки швидко протікаючих процесів в атмосфері.

Залежно від завдання, яке стоїть перед дослідником при лазерному зондуванні атмосфери, до спектрами випромінювання лазерів пред'являються різні вимоги. Наприклад, при зондуванні стратифікації аерозольних утворень до ширини спектра практично не пред'являється будь-яких особливих вимог, оскільки навіть при її значенні порядку десятків нанометрів можна вважати, що

коефіцієнт розсіювання, який визначається за даними зондування, практично не змінюється протягом зазначеного інтервалу довжин хвиль.

Найбільш жорсткі вимоги до спектрами випромінювання лазерів пред'являють завдання зондування газових компонентів атмосфери.

Лідар - пристрій, призначений для дослідження (зондування) атмосфери, основною частиною якого є лазер, який входить до складу установки.

1.1.4 Принцип роботи лідару і характеристики лідарного методу з використанням спонтанного комбінаційного розсіювання.

Принцип роботи лідарів полягає в наступному: в атмосферу посиляється, як правило, додатково колімірований лазерний промінь і ведеться спостереження за світлом, розсіяним в зворотному напрямку.

При цьому спектральний зсув сигналу СКР забезпечує вибірковість методу і робить результати визначень незалежними від стану атмосфери (наявності в ній частинок аерозолі, флуктуації температури). У цьому полягає вирішальна перевага лідара, заснованого на явищі СКР (комбінаційного лідару).

Типовий прилад складається з імпульсного лазера, здатного генерувати потужні моноімпульси або послідовність імпульсів (що важливо для здійснення безперервного спостереження за атмосферою і підвищення чутливості методу); телескопа, що розширює збуджуючий світловий пучок, а значить, і зменшує його розходженість; приймального телескопу, що збирає розсіяне випромінювання на вхідній щілині спектрального апарату або на блоці підібраних вузькосмугових інтерференційних фільтрів; системи прийому, реєстрації і обробки інформації.

Розрізняють моностатичні і бістатичні лідарні системи (див. рис. 1.1) [1]. У моностатичних системах заснованих переважно на використанні розсіювання (лідар на КР, резонансних ефекти, диференційному поглинанні розсіяного випромінювання), лазерне джерело і приймальний телескоп розташовані в безпосередній близькості один від одного.

Бістатичні (рознесені) системи характеризуються тим, що мають або окремо розташовані лазерний передавач і приймальний телескоп, або лазер і телескоп, розташовані в одному місці, але рознесені на значну відстань.

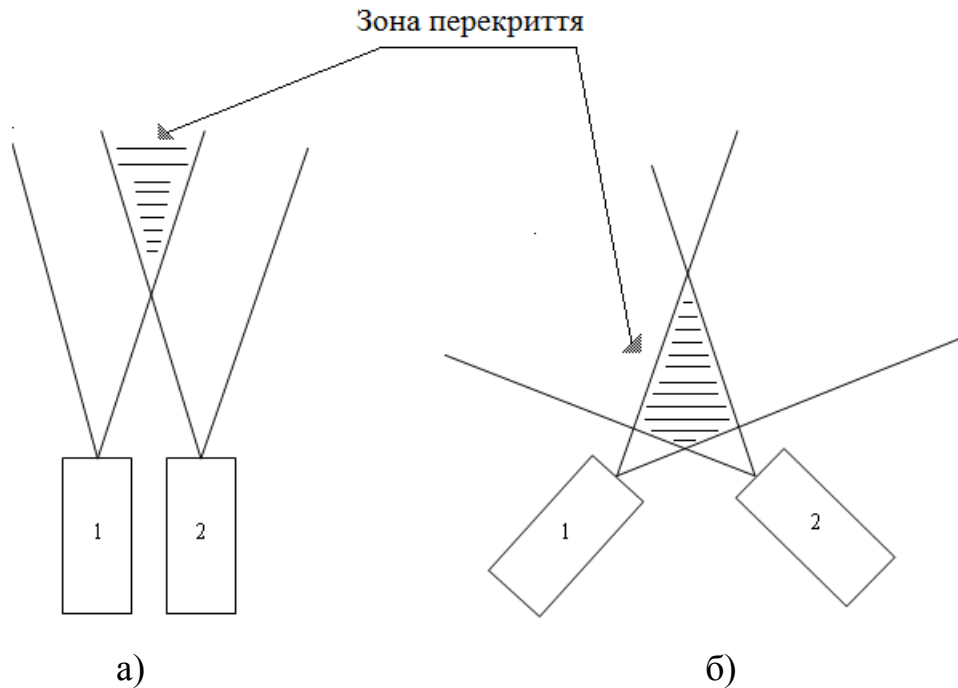


Рисунок 1.1 – Лідарні системи: а) моностатична; б) бістатична

1 – передавач; 2 – приймач

Для лідарів дуже перспективні лазери на основі органічних барвників і кристалів з центрами забарвлення [2]. Особливо цікава система, що складається з такого лазера, що накачується зовнішнім імпульсним лазером, в якій можливо отримувати випромінювання, що перекриває спектральну область 350,0-900,0 нм при задовільній середній потужності [1].

У лідарі використовуються і напівпровідникові лазери. Випромінювання напівпровідникових діодних лазерів перестроюється при зміні ширини забороненої зони, яке здійснюється за допомогою гідростатичного тиску, магнітного поля або температури. Окремі напівпровідникові лазерні діоди дають звичай випромінювання з шириною смуги близько 1 см^{-1} , і перестроювання їх досягається зміною струму. Для діодів на основі домішкових напівпровідників підбором складу домішки можна отримати генерацію на одній частоті. Спектральна ширина смуги в цьому випадку не перевищує декількох кілогерц,

вирішуються окремі коливально-обертальні лінії. Діодні лазери компактні і порівняно дешеві, але в ряді випадків працюють тільки при низьких температурах.

У потужних газових лазерах на CO_2 і CO , що працюють при високому тиску, завдяки перекриттю сусідніх коливально-обертальних ліній отримують безперервно перебудовуване випромінювання в діапазонах відповідно 9,1-11,3 мкм і 4,8-8,5 мкм, а в лазерах високого тиску на HF/DF - в діапазонах 2,6-5 мкм. Лазер на КР зі зміною орієнтації спина має унікально малу ширину лінії, що не перевищує 1 кГц. Отже, даний лазер є потенційно цінним джерелом світла для інфрачервоної спектроскопії з високою роздільною здатністю.

Тривалість імпульсу важлива в тій мірі, в якій важливим є просторовий дозвіл. Щоб зафіксувати висоту, на якій проводяться вимірювання, використовують двоканальний осцилограф, в якому один канал дає інформацію про збуджувальне випромінювання, а інший - про розсіяне. Істотною є також різка залежність потужності повернутого сигналу від відстані. Для комбінаційних лідарів важливим є сумарний перетин СКР в зворотному до падаючого випромінювання напрямку.

З наближенням частоти падаючого світла до однієї з власних частот речовини перетин СКР більш-менш різко збільшується. Це є одним з потенційних джерел підвищення порогової чутливості лідаров, що використовують в якості зворотного сигналу випромінювання резонансне СКР (РСКР).

У оптичну схему лідара входять телескопи: передавальний і приймальний. Передавальний телескоп (лінзовий або дзеркальний) повинен мати приблизно 10-кратне збільшення. Додаткове колімування збуджувального променю не потрібно. Діаметр приймального телескопа повинен бути досить великий: від цього залежить кількість зібраного світла. Зазвичай використовується дзеркальна система касегреновського типу діаметром до 50 см і більше.

Переваги схеми лазерних локаторів, заснованих на КР:

- на відміну від методів резонансного розсіювання не потрібно застосування певної частоти лазерного випромінювання. Тому можна працювати на частоті, яка слабо поглинається в атмосферних газах, хоча для підвищення чутливості краще працювати на більш коротких довжинах хвиль;

- забезпечується дослідження газових компонент атмосфери з високою роздільною здатністю по дальності. Довжина хвилі може перестроюватися для спостережень ізольованих комбінаційних спектрів окремих молекулярних сполук. Це обумовлено правилами відбору, які істотно відрізняються від правил відбору для звичайних спектрів випромінювання і поглинання;

- схема не обмежена певними типами молекул. Вона може застосовуватися водночас для виявлення багатьох хімічних сполук, що містяться в атмосфері. Для вивчення з'єднань, спектр яких заздалегідь невідомий, бажано, щоб детектування всіх частот комбінаційного спектра здійснювалося одночасно або якомога швидше;

- повністю усувається невизначеність в даних зворотного розсіювання, в разі, коли частота розсіяного сигналу дорівнює частоті випромінювання лазера. Схема дозволяє встановити вид розсіювання сигналу (релеєвське або розсіювання на частинках). В результаті забезпечуються незалежні вимірювання профілю аерозолі і профілів щільності газових компонент атмосфери;

- розсіяні сигнали завжди містять комбінаційний відбитки від основних атмосферних газів (N_2 і O_2), тому абсолютну молекулярну щільність будь-якого з'єднання легко отримати, порівнюючи інтенсивності розсіяних сигналів, прийнятих з однієї і тієї ж області атмосфери.

Недоліки схеми. Основним недоліком є невисока чутливість при великих відстанях. Це обумовлено тим, що поперечний перетин КР на три порядки менше релеєвського. Отже, необхідні лазери з високою потужністю випромінювання в більш короткохвильовому діапазоні довжин хвиль.

1.1.5 Лідари, призначені для дослідження атмосфери (метрологічні лідари)

Основними тактико-технічними характеристиками лідарів, призначених для дослідження атмосфери є:

- дальність дії;
- роздільна здатність;
- точність вимірювань визначених параметрів;
- час вимірювань;
- час обробки первинної інформації.

На відміну від радіолокаторів, ефективність застосування лідарів залежить від часу доби. Дальність дії лідару (відстань, з якої із заданою за час зондування точністю ще можливий прийом сигналу, обумовлений певним видом розсіювання) визначає основні параметри приймально-передавального тракту. До них відносяться:

- енергія ОКГ;
- діаметр оптичної антени;
- пропускання приймальної оптичної системи;
- кути розходження передавача і поля зору приймача.

Роздільна здатність не може бути краще просторової протяжності імпульсу випромінювання лазера, що визначається формулою:

$$\Delta H = \frac{c\tau_i}{2},$$

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

За своїм призначенням та тактико-технічними параметрами метеорологічні локатори (МЛ) можна розділити на кілька основних типів:

- МЛ для визначення просторово-часових варіацій аерозолю в приземному шарі повітря, характеристик хмар і туманів;

- МЛ для зондування тропосфери, стратосфери і мезосфери з метою вивчення атмосферного аерозолі і деяких стандартних метеорологічних параметрів;
- МЛ для визначення газових компонент в приземному шарі атмосфери методом спонтанного комбінаційного розсіювання або резонансного поглинання;
- МЛ, що вимірюють швидкість вітру в тропосфері доплеровським або растровим методом. При цьому доплеровський МЛ може бути використаний для визначення температури.

1.1.6 Основні елементи МЛ

Найбільшого поширення в якості передавачів МЛ отримали твердотільні ОКГ, що пов'язано з їх високою потужністю в імпульсі і малою тривалістю імпульсу в режимі модуляції добротності. Найчастіше використовуються ОКГ на рубін, неодиму або ітрій-алюмінієвому гранаті з потужністю в імпульсі на першій гармоніці до декількох десятків МВт, при тривалості імпульсу 5-30 нс і частоті проходження імпульсів 0,1-100 Гц.

ОКГ на барвниках використовуються зокрема при резонансному зондуванні і визначенні NO₂ і SO₂ методом резонансного поглинання.

Рідше в порівнянні твердотільними ОКГ і ОКГ на барвниках в метеорологічній лазерній локації застосовуються газові лазери.

Оскільки приймальна апаратура має «мертвий» час, тобто час, протягом якого апаратура не може зареєструвати черговий сигнал, так як вона зайнята опрацюванням попереднього, при зондуванні шарів атмосфери, близько розташованих до МЛ, можлива втрата сигналу. Тому, при реєстрації з малих відстаней сильних світлових потоків в режимі рахунку фотонів в приймальній системі використовуються нейтральні оптичні послаблювачі. Це дозволяє знизити число імпульсів до величини, при якій роль «мертвого» часу є несуттєвою.

Приймання сигналів в певному діапазоні спектра здійснюється використанням вузькосмугових інтерференційних фільтрів або спектральних приладів

Реєструвальні системи МЛ включають в себе радіоелектронні блоки реєстрації та обробки інформації, в яких використовується широкий клас спеціальних систем.

1.2 Приклади схем лідарів

1.2.1 Лідар для визначення характеристик хмарності. У передавальному пристрої в лідарі МЛ ЛР-2 використовується ОКГ на рубіні [1]. Структурна схема МЛ ЛР-2 наведені на рис.1.2 [1].

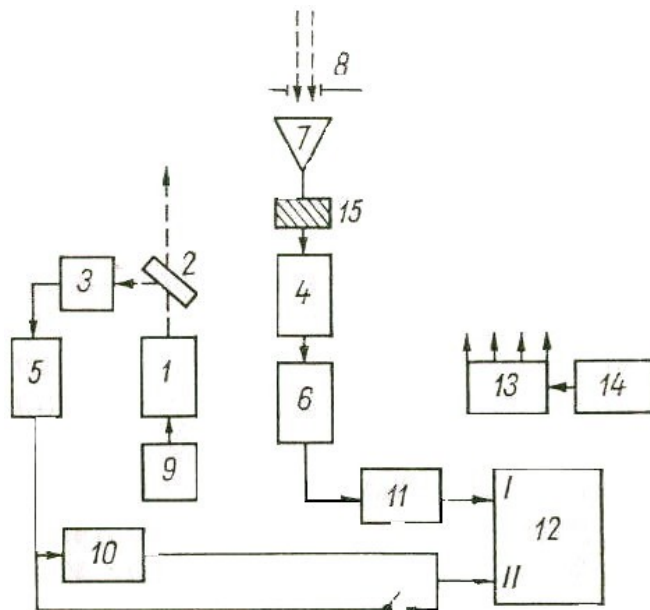


Рисунок 1.2 - Структурна МЛ ЛР-2

На рис. 1.2 позначені наступні елементи:

1 – оптичний квантовий генератор (лазер); 2 - світлоподілювальна пластинка; 3 – фотоелемент коаксіальний ФЕК-09; 4 – фотоелектронний помножувач ФЕП-79; 5 - формувач пускового імпульсу; 6 – попередній підсилювач; 7 – вхідний приймальний телескоп на основі об’єктиву МТО-1000; 8 - регульована діафрагма поля зору; 9 - блок запуску і накопичувач; 10 - генератор Г5-15; 11 - підсилювач; 12 – осцилограф С1-11; 13 - блок живлення; 14 - блок управління; 15 - інтерференційний фільтр.

1.2.2 для зондування верхньої атмосфери.

МЛ, призначені для дослідження верхньої тропосфери, стратосфери і мезосфери, характеризуються перш за все, апаратурою, здатною детектувати слабкий сигнал зворотного розсіювання в режимі рахунку фотонів. Для збільшення дальності дії прийомні антени таких лидаров, в порівнянні з антенами лидаров для зондування хмар мають великі розміри. Відповідно в лазерних системах висотного зондування використовуються імпульсні ОКГ.

При локації верхньої атмосфери сигнал розподілений з шумом в межах всього інтервалу спостереження [1]. Структурна схема МЛ ЛР-ЗМ представлена на рис.1.3 [1]

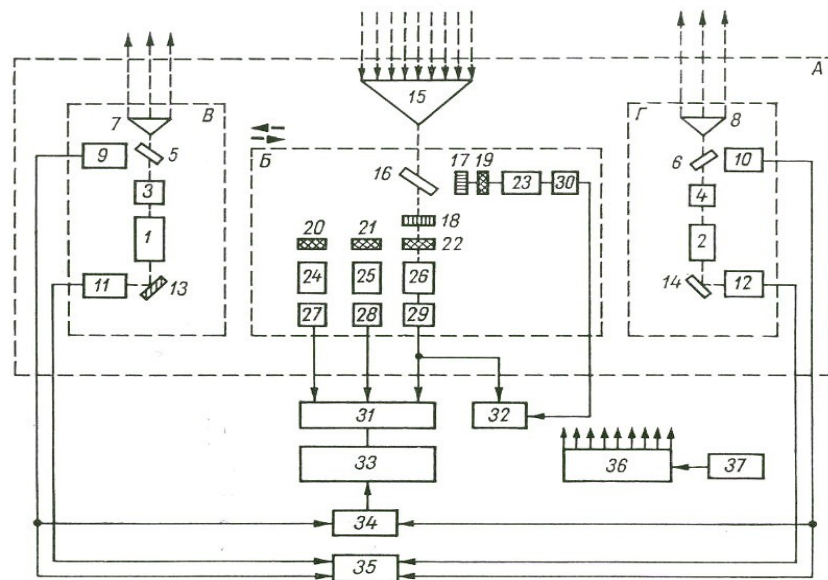


Рис.1.4 - Структурна схема МЛ ЛР-ЗМ

На рис. 1.2 позначені наступні елементи:

А - приймально-передавальна оптична система; Б - блок ФЕП; В, Г - блоки ОКГ; 1,2 - ОКГ, 3, 4 – нелінійні кристали КДП; 5, 6, 13, 14, 16 - оптичні світлоподілювачі; 7,8 - передавальні антени; 9-12 - ФЕК; 15 - приймальна антена; 17, 18 - вибіркові фільтри; 19-22 - інтерференційні фільтри; 23-26 - ФЕП; 27-30 – попередні підсилювачі; 31 - блок підсилювачів; 32 - дільник; 33 - реєстратор; 34 - синхронізатор; 35 - вимірювач енергії ОКГ; 36 - блок живлення; 37 - пульт управління.

Висновки за розділом:

- лідарні технології є перспективними методами дистанційного дослідження навколишнього середовища;
- типова лідарна система має у своєму складі лазерний випромінювач, приймальний оптичний телескоп, пристрій реєстрації та обробки даних та пристрій управління;
- просторова роздільна здатність лідару визначається тривалістю лазерного імпульсу.

2 АНАЛІЗ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ЛІДАРНИХ СИСТЕМ

2.1. Аналіз лідарних методів дослідження атмосфери

Теоретичні та експериментальні дослідження в області метеорологічної лазерної локації відкривають нові можливості у вивченні параметрів атмосфери, прогнозування погоди, організації контролю впливів на навколишнє середовище та ін.

Лазерно-локаційні вимірювання параметрів атмосфери є дистанційними і не потребують метеорологічних підйомних засобах таких як, стратостати, балони-зонди та метеорологічні ракети. Тому при такому способі вимірювань немає збурення середовища і, отже, немає необхідності розглядати газодинамічні ефекти взаємодії вимірювального датчика з атмосферою, облік яких часом буває не тільки дуже складний, але і неможливий [1]. Лідари можна використовувати в будь-якій точці Землі і отримувати при зондуванні розрізи атмосфери за невеликі проміжки часу, коли стан основних атмосферних параметрів не встигає змінитися. Використання хвиль оптичного діапазону дозволяє створити малогабаритну приймально-передавальну апаратуру лазерного локатора в порівнянні з аналогічною радіотехнічної апаратурою, що важливо при створенні бортових лідарних систем.

При поширенні лазерного випромінювання в атмосфері використовуються ефекти взаємодії електромагнітної хвилі з атмосферою, які дозволяють зробити висновок про її властивості. До цих ефектів належать: розсіювання на атмосферних аерозолях, молекулярне розсіювання, спонтанне комбінаційне розсіювання, резонансне розсіювання і поглинання, деполяризація, доплерівське теплове розширення і зрушення частоти випромінювання, флуктуації амплітуди і фази світлової хвилі [1]. Велика частина перерахованих явищ спостерігається одночасно, і практична сторона справи полягає в створенні способів виділення із загальної інформації тієї частини, яка містить інформацію про певну характеристику атмосфери.

Принциповим є те, що використовуючи лазерні методи досліджень, можливо отримати дані про всі найбільш важливі параметри атмосфери [1].

До стандартних метеорологічних параметрів відносяться:

- температура;
- тиск;
- швидкість і напрям вітру;
- вологість атмосфери;
- щільність і концентрація домішок.

Для складання довгострокових прогнозів погоди і рішення проблем контролю повітряного басейну необхідно вимірювати зазначені параметри з високим просторовим і часовим дозволом. Застосовувані для цих цілей контактні датчики, що встановлюються на радіозондах і метеорологічних ракетах, характеризуються значною дискретністю в часі і просторі.

Лазерні методи, що використовуються для дистанційного вимірювання стандартних параметрів атмосфери, забезпечують високу просторову роздільну здатність, швидкість і високу частоту вимірювань.

В даний час найбільш широко застосовуються лідарні системи для вимірювання стандартних метеорологічних параметрів на висотах до 10 - 20 км [2-8]. Значна щільність атмосфери на цих висотах створює потужний сигнал зворотного розсіювання, що дозволяє застосовувати стандартні промислові лазери і невеликі за габаритами приймальні оптичні системи. Можливість вимірювання на цих висотах метеорологічних параметрів за допомогою підйомних куль-радіозондов дозволяє проводити калібрування апаратних засобів лідарних систем і оцінити помилки вимірювання метеорологічних параметрів.

Велика увага в даний час приділяється вивченню стратосферного озонового шару на висотах 20-30 км, який захищає приземне середовище від жорсткого ультрафіолетового випромінювання Сонця. Проведення ядерних випробувань, запуски космічних ракет, польоти висотних надзвукових літаків, промислові викиди в атмосферу руйнують озоновий шар, що може несприятливо вплинути на екологічну рівновагу біосфери Землі.

До появи лідарів контроль концентрації озону здійснювався наземними фотометричeskими станціями, що вимірюють рівень ультрафіолетового випромінювання Сонця, яке пройшло через атмосферу. Відсутність відомостей про вертикальну та просторову стратифікації не дозволяє вивчати динаміку атмосферних шарів. Застосовуваний в даний час балонний метод вивчення стратосферного озону економічно не вигідний.

Вимірювання висотного профілю концентрації озону лідарними системами за методом диференціального поглинання [9] дозволяє створювати мережу озонетричних станцій, які отримують тривалі тимчасові ряди спостережень з високою просторовою роздільною здатністю [10]. Обговорюється можливість установки лідарного озонетру на борту космічного апарату для дослідження озонового шару на більшій частині Земної кулі [11].

Значний інтерес для складання довгострокових прогнозів погоди, вивчення динамічного стану атмосфери, оцінки ролі Сонячно-Земних зв'язків представляють лідарні дистанційні методи вивчення параметрів страти-мезосфери і нижньої термосфери.

Для вивчення верхньої атмосфери найбільш широко використовують висотні метеорологічні ракети, застосування яких пов'язане з великими матеріальними витратами. Ракетний метод накладає жорсткі обмеження на вибір місця розташування стартових майданчиків і тому не може забезпечити безперервних тривалих тимчасових і просторових рядів спостережень в інтересах екологічного моніторингу.

При проектуванні лідару необхідно враховувати, що з ростом висоти зменшується щільність атмосфери і, як наслідок, зменшується сигнал зворотного розсіювання, що вимагає застосування потужних унікальних лазерів і великих за габаритами приймальних оптичних систем.

Основним ефектом взаємодії електромагнітної хвилі з повітряним середовищем на великих висотах, які мають практичне застосування в метеорологічних лідарах, є резонансне розсіювання. На висотах 80 - 100 км постійно знаходиться атомарний натрій з концентрацією 10^3 - 10^4 см⁻³ та інші домішки.

Зазначені висоти є досить інформаційними з точки зору багатьох геофізичних проблем: сріблясті хмари, мезопауза, абляція метеорної речовини і ін. На довжинах хвиль, відповідних спектру поглинання натрію з основного рівня - 589 нм, можна використовувати випромінювання потужних імпульсних перебудованих лазерів на органічних барвниках [2]. При зазначеній концентрації натрію коефіцієнт зворотного резонансного розсіювання становить $6 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$. Ця величина значно більше коефіцієнтів зворотного молекулярного розсіювання на висотах 80 - 100 км ($2 \cdot 10^{-13} - 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$) і зворотного аерозольного розсіювання ($\sim 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$), отриманого при лазерному зондуванні атмосфери до висот 120 км, де спостерігається абляція і гальмування космічного речовини метеорної матерії [1].

Проведені лідарні вимірювання щільності натрію на висотах 80 - 100 км свідчать про нерегулярну структуру шару. Сезонні варіації шару натрію узгоджуються з даними сутінкових спостережень. Зростання концентрації натрієвого шару в періоди метеорних потоків вказують на метеорне джерело формування натрієвого шару. Вивчення динаміки нижньої межі шару дозволяє судити про фотохімічні процеси, що протікають на зазначених висотах [12].

В процесі лідарного зондування натрієвого шару були виміряні температурні режими атмосфери з використанням поглинаючої натрієвої камери [12]. З використанням лазерної доплерівської апаратури метод може бути застосований для визначення швидкості і напрямку вітру у верхній атмосфері [1].

Проводячи зондування в трьох рознесених точках простору, методом кореляційного аналізу висотних профілів шару натрію оцінені горизонтальні швидкості вітру на висотах 80 - 100 км [12]. Отримане значення горизонтальної швидкості складає 50 м/с, що відповідає значенням, отриманим за допомогою метеорних і ракетних спостережень.

До теперішнього часу за методом резонансного розсіювання проведено зондування атмосферного калію, літію, і інших малих домішок у верхній атмосфері (наприклад: Ca, Ca⁺, Fe і ін.).

2.2 Системна класифікація метеорологічних лідаров

Сучасні метеорологічні лідари (МЛ) мають всі властивості і якостями складних радіотехнічних систем. Основні з них такі:

- чітко виражене цільове призначення, що дозволяє розглядати МЛ з позицій цілеспрямованих систем;
- складність процесу обробки лідарної інформації та процесу управління функціонуванням підсистем МЛ, що призводить до необхідності застосування засобів автоматизації і створення обчислювальних структур;
- багатостадійність життєвого циклу МЛ, що породжує ряд системних проблем на різних стадіях розробки, випробувань, експлуатації та модернізації МЛ [13].

Корисна інформація про параметри атмосфери виникає в результаті взаємодії електромагнітної хвилі з середовищем, тобто при безпосередній взаємодії з об'єктом інформаційної взаємодії (ОІВ). При цьому здійснюється природна модуляція окремих параметрів оптичного сигналу, заснована на фізичних ефектах інформаційної взаємодії. Тому МЛ відносяться до класу метеорологічних радіотехнічних систем [13]. Необхідність багаторівневої обробки лідарного сигналу для отримання метеорологічної інформації, а також передача цієї інформації по радіотехнічним каналах зв'язку дозволяє класифікувати лідарні системи як інформаційно-метеорологічні.

Використання електромагнітних коливань для забезпечення інформаційної взаємодії вимагає витрат енергетичних ресурсів на генерацію оптичного зондуючого сигналу і концентрацію випромінюваної потужності в напрямку на об'єкт. Вплив середовища поширення електромагнітних хвиль призводить до ослаблення потоку потужності на вході приймальної системи, що сприяє появі перешкод. Тому середовище являє собою сукупність спеціальних елементів, що не входять до складу системи, але надають на неї певний вплив.

Для МЛ основними факторами, об'єднаними поняттям середовища, є:

- щільні шари нижньої атмосфери, які розсіюють і поглинають частину ізлученного і назад-розсіяного сигналу;
- аерозольні частки (хмари, туман, пилові домішки та ін.), які значно обмежують дальність дії МЛ;
- зовнішнє оптичне засвітлення від Сонця, Місяця, зірок, а також розсіяне в атмосфері світло.

До фактору, що обмежує якість функціонування МЛ, відноситься значна нестационарність всіх зазначених параметрів, об'єднаних поняттям середовища.

Введена класифікація факторів середовища дозволяє виділити загальносистемні рішення, що зменшують її антагоністичну дію. Так, наприклад, розташування лідарів в гірській місцевості на висоті 2 - 3 км над рівнем моря значно зменшує поглинання сигналу нижніми щільними шарами атмосфери і аерозольними утвореннями, характерними для великих індустріальних міст. Суттєве зменшення впливу середовища досягається при установці МЛ на літальних апаратах, зокрема на літаках [1] і космічних апаратах (КА).

Особливістю МЛ є те, що навколишнє середовище є одночасно об'єктом інформаційної взаємодії (ОІВ) і джерелом інформації. Двоїстий характер середовища проявляється в тому, що сигнал, розсіяний в нижніх шарах атмосфери, містить інформацію про метеорологічні параметри.

Задані показники якості функціонування МЛ при наявності ситуаційної невизначеності можна забезпечити на основі методів його адаптації до умов інформаційної взаємодії і використанні принципів навчання, що дозволяють досягти поставленої мети в міру отримання, обробки та аналізу інформації, що надходить при зміні в широких межах зовнішніх умов, які впливають на якість функціонування комплексу в цілому і його підсистем [13].

Застосування системного підходу до завдань формування адаптивної структури МЛ дозволяє запропонувати три ієрархічних рівня адаптації: алгоритмічний, параметричний і адаптація функціонування МЛ.

Рівень алгоритмічної адаптації реалізується при вторинній обробці інформації і в принципі не вимагає ніяких змін в структурах приймально-вимірювальних підсистем. Алгоритмічна адаптація МЛ полягає в створенні комплексу алгоритмів обробки інформації для визначення метеорологічних параметрів при наявності значної нестаціонарності досліджуваних процесів і апіорної ситуаційної невизначеності інформаційної взаємодії.

Алгоритмічна адаптація реалізується не тільки в реальному масштабі часу для оперативної оцінки метеорологічних параметрів, але й можлива багаторазова обробка лідарної інформації після проведення вимірювань з метою пошуку найбільш адекватного алгоритму обробки і більш повного вилучення всіх параметрів, що підлягають визначенню.

Рівень параметричної адаптації МЛ зводиться до адаптивного вимірювання параметрів приймально-вимірювальних підсистем для вирішення завдань подолання апіорної ситуаційної невизначеності. Параметрична адаптація реалізується в темпі надходження вхідної інформації і зазвичай включає в себе:

- захист приймальних пристроїв від перевантажень, викликаних взаємодією з середовищем;
- адаптивну просторову і тимчасову селекцію джерел інформаційної взаємодії;
- адаптивна зміна параметрів пристрою первинної обробки інформації при зміні умов інформаційної взаємодії з середовищем і ОІВ.

Адаптація поведінки МЛ, або адаптивне управління функціонуванням МЛ і його підсистемами, являє собою найбільш високий ієрархічний рівень адаптації. Вона включає в себе описані рівні алгоритмічної і параметричної адаптації. Однак особливістю адаптації поведінки є те, що МЛ розглядається як об'єкт управління. Сам процес управління складається з ряду етапів:

- отримання інформації про зміну умов функціонування МЛ;
- обробка та аналіз отриманої інформації для ідентифікації конкретно ситуації, що склалася;

- вироблення оптимальної стратегії поведінки МЛ і конкретних заходів щодо її параметричної та алгоритмічної адаптації;
- реалізація обраної стратегії поведінки, цілеспрямована зміна параметрів і структури МЛ;
- оцінка ефективності прийнятої стратегії поведінки і її корекція на основі знову надійшла інформації [13].

Етапи процесу управління в реальному масштабі часу реалізуються при включенні в контур управління ЕОМ.

На ранніх етапах життєвого циклу МЛ збором і обробкою інформації займається оператор. При цьому на якість прийняття рішення істотно впливає повнота, достовірність і швидкість сприйняття інформації оператором в реальному масштабі часу роботи МЛ. Оптимальне рішення цього завдання досягається застосуванням сучасних діалогових пристроїв відображення інформації - дисплеїв.

Включення в контур управління МЛ мікроконтролера, а також використання алгоритмічної адаптації визначає необхідність розробки функціонально-програмного забезпечення (ФПО) вже на ранніх етапах життєвого циклу. Це змушує розробників ФПО створювати математичні моделі ОІВ і проєктованого МЛ, не чекаючи створення дослідних зразків. Ці математичні моделі спочатку використовуються для оцінки ефективності розроблюваної системи ФПО, а на етапі випробувань і експлуатації МЛ входять в розроблений комплекс алгоритмів і програм в якості робочих імітаційних модулів для автономних перевірок ФПО.

Сучасний рівень розвитку ЕОМ і їх програмного забезпечення, розробка аналітичних і чисельних методів для дослідження процесів інформаційної взаємодії в радіотехнічних системах дозволяє вважати методи цифрового моделювання найбільш доцільними при вирішенні задач аналізу і синтезу МЛ і їх підсистем.

Методи математичного моделювання найбільш ефективні при розробці бортових локаційних систем КА, оскільки проведення натуральних експериментів пов'язане з невиправдано великими матеріальними витратами.

Проведений системний аналіз визначає узагальнену структуру автоматизованої системи обробки лідарного сигналу (рис. 2.1).

Оптичний сигнал, відбитий об'єктом інформаційної взаємодії, перетворюється в випадковий потік електричних імпульсів на виході фотоелектронного перетворювача.

Пристрій обробки лідарного сигналу перетворює випадковий потік електричних імпульсів в нормовані коди лідарної інформації для введення в ЕОМ і збереження в її ПЗУ або реєстрації на зовнішньої пам'яті. Після збереження інформації можна реалізувати алгоритмічну адаптацію після проведення вимірювань з метою найбільш повного виділення всіх параметрів, що підлягають визначенню.

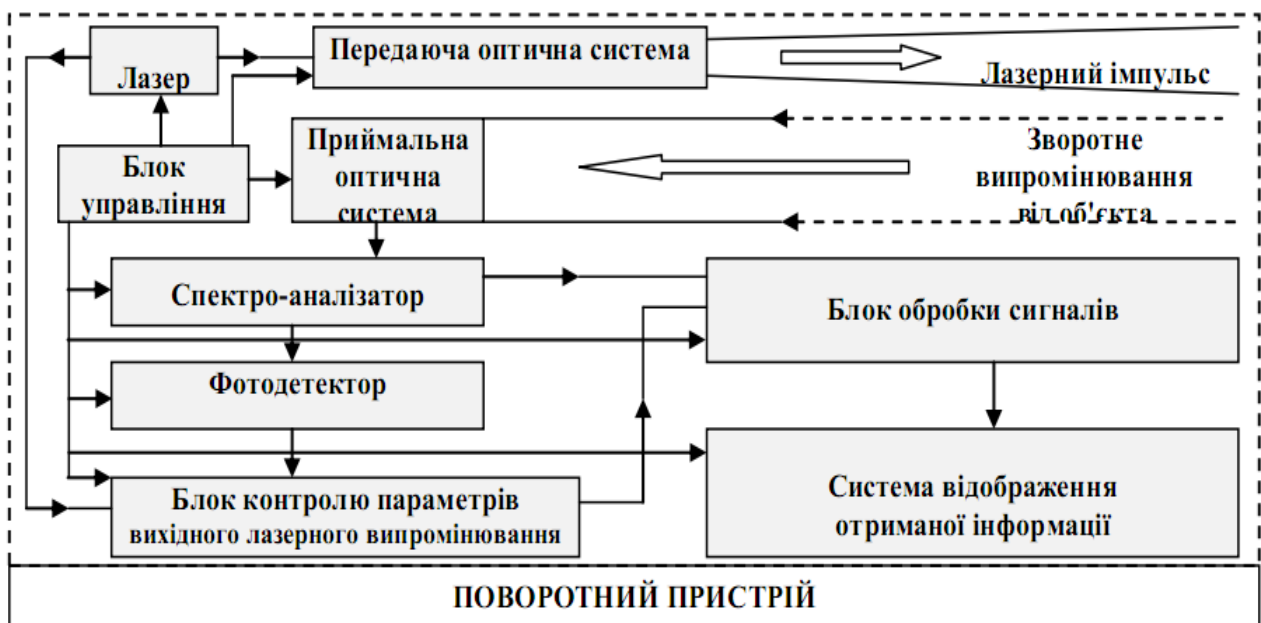


Рисунок 2.1 – Загальна структурна система лідарної станції

Алгоритм обробки лідарного сигналу задається пристроєм управління. Канал зв'язку між ЕОМ і пристроєм управління дозволяє реалізувати адаптивне управління функціонуванням МЛ в реальному масштабі часу.

До складу ЕОМ входять апаратні засоби для зберігання і вибору функціонально-програмного забезпечення (ФПО) і математичних моделей процесів інформаційного впливу (ПІВ), що включають тестові програми для перевірки працездатності всієї системи або окремих пристроїв.

Лідарна інформація, що обробляється в ЕОМ, передається в канал телеметрії, роздруковується в документує пристрою та на екрані дисплея в найбільш зручною для оператора формі.

В процесі вимірювання, у міру зменшення апіорної невизначеності оператор має можливість змінювати алгоритм обробки лідарного сигналу, а також вводити нові програми в ЕОМ.

На ранніх етапах життєвого циклу МЛ, при відсутності мікроконтролера, інформація записується в пам'ять і відображається на екрані дисплея. В процесі вимірювання оператор має можливість змінювати деякі параметри пристрою обробки лідарного сигналу. Ці параметри у вигляді службової інформації реєструються і враховуються при обробці на ЕОМ після проведення вимірювань.

Дискретизація параметрів оброблюваного сигналу призводить до появи специфічних похибок вимірювання, нехарактерних для лідарів, які вивчають нижні шари атмосфери з застосуванням аналогової обробки токового сигналу ФЕП. На точність вимірювання впливає вибір параметрів автоматизованого пристрою обробки, тобто виникає задача сполучення каналу обробки з досліджуваним сигналом.

Для автоматизованих систем характерна наявність великих масивів оброблюваної інформації. Подання цієї інформації оператору в цифровому вигляді не дозволить йому своєчасно і правильно переробляти інформацію і приймати адекватні дії для управління, таким чином, виникає зворотна задача перетворення інформації для сполучення її з каналом прийому, тобто можливостями оператора.

Алгоритми обробки лідарного сигналу для отримання параметрів верхньої атмосфери найбільш широко розробляються в даний час.

2.3 Аналіз хвильових процесів в атмосфері як динамічного параметра об'єкта інформаційної взаємодії метеорологічних лідарів

Одним з найбільш широко обговорюваних в даний час явищ у верхній атмосфері Землі слід назвати постійно існуючі хвилеподібні неоднорідності щільності і складі нейтральних і іонізованих атмосферних компонентів. Загальновизнана трактування фізичної природи цих неоднорідностей заснована на уявленнях про акустико-гравітаційних хвилях, що змінюють локальні щільнісні характеристики атмосфери практично у всій її товщі - від земної поверхні до висот в декілька сотень кілометрів [14].

Лідарні вимірювання атмосферного натрію на висотах 80 - 100 км за методом резонансного розсіювання, проведені у нас в країні [12] і за кордоном, виявили значну стратифікацію щільності натрієвого шару і вертикальне переміщення екстремумів концентрації. Вимірювана модуляція щільності натрієвого шару, а також динамічні процеси, пов'язані з ними, дозволяють віднести ці явища до прояву внутрішніх гравітаційних хвиль (ВГВ) [14]. У деяких джерелах прийнято термін - хвилі плавучості [14].

Атмосферні гравітаційні хвилі являють собою коливання атмосфери, природа яких в значній мірі визначається дією сили тяжіння. Їх періоди лежать в межах 10 хвилин - 24 години, а довжини хвиль 100 м - 1000 км. У цьому сенсі вони включають в себе деякі моди приливних коливань [14].

На низьких частотах основний внесок роблять зміни погоди синоптичного масштабу, припливи, добовий сонячний нагрів і періодичні зміни напрямку бризової циркуляції. На більш високих частотах головний внесок належить хвилям плавучості (ВГВ), конвекції і яку переносять вітром турбулентності. Добові коливання щільності проявляються як результат припливів і інших добових впливів [14].

Стратифікація щільності атмосфери під впливом гравітаційного поля здебільшого статистично стійка, і саме ця стійкість дозволяє виділити хвилі плавучості.

чості (ВГВ) в якості зручного і важливого предмета геофізичних досліджень [14].

Через зменшення щільності атмосфери зі збільшенням висоти амплітуда хвиль зростає, що є наслідком закону збереження енергії [14]. Багато з хвиль, які спостерігаються у верхніх шарах атмосфери, утворюються нижче тієї висоти, на якій можна їх спостерігати. В процесі їх переміщення вони відбирають енергію і кількість руху за величиною меншою в порівнянні з кінетичної енергією і кількістю руху самої генеруючої хвилі середовища, але вже достатньою, щоб вплинути на розріджені шари, розташовані вище [14].

Якщо спостерігати поширення вертикальної фази ВГВ, то воно майже незмінно спрямована вниз. Внаслідок анізотропії, що вноситься силою тяжіння, енергія хвилі, в загальному випадку, передається не в тому напрямку, куди поширюється фаза. В хвилі, енергія якої спрямована похило вгору, фаза поширюється похило вниз. Велика частина джерел, що породжують гравітаційні хвилі у верхній атмосфері, розташована на нижніх рівнях, що постачають їх енергією [14].

Значні швидкості вітру при поширенні хвилі в атмосфері з великим вертикальним зрушенням призводять до виникнення нестійкості і руйнування хвиль. У загасанні хвиль основну роль грають чотири фізичні процеси: турбулентна дифузія, в'язка діSSIPАЦІЯ, захоплення хвиль критичними шарами атмосфери, нелінійні ефекти [14].

Спектр хвиль, які спостерігаються в будь-якому заданому місці в будь-який заданий момент, повинен складатися як з компонент довжин хвиль, порівняно вільних від ефектів затухання, так і з компонент, що піддаються сильному загасання.

Джерела ВГВ можна умовно розділити на 4 групи:

- джерела, пов'язані з процесами в атмосфері - грозові фронти, струменеві течії, полярні саява і ін.;

- джерела, пов'язані з взаємодією з космічними тілами - приливні коливання, рухом термінатора, висипанням енергетичних частинок у верхній атмосфері і ін.;

- джерела, пов'язані з процесами, що протікають на поверхні Землі - виверження вулканів, землетруси, коливання поверхні океану і інші;

- антропогенні джерела, пов'язані з діяльністю людини - ядерні і будівельні вибухи, запуски ракет, польоти надзвукових літаків і ін.

Вивчення хвильових процесів в атмосфері дозволяє визначити параметри цих процесів (фазу, амплітуду, частоту, параметр загасання), визначити напрям поширення хвильових рухів і, вирішуючи екстраполяційні задачі, визначити координати джерел ВГВ. Це відкриває нові можливості у вирішенні таких важливих завдань, як прогнозування погоди, контроль повітряного середовища, визначення ступеня впливу людської діяльності на атмосферу, а також дозволяє дистанційно визначати координати запуску ракет, ядерних вибухів і інших енергетичних впливів на атмосферу.

2.4 Аналіз технічних засобів вимірювання параметрів ВГВ

ВГВ є хвильовим процесом, захоплюючим часом всю атмосферу. Так, сигнали від ядерних вибухів, що обігнули земну кулю, можуть бути зареєстровані мікробарографами і мають досить складний спектр з основним періодом близько 5 хвилин [14].

Мікробарографічний метод реєстрації ВГВ з рознесеною мережею наземних станцій дозволяє визначати параметри хвиль, швидкість їх поширення і напрямок на джерело хвиль. Недолік методу - вимір ВГВ у поверхні Землі, де амплітуда хвиль значно менше, ніж у високих шарах атмосфери.

Радіометричне зондування дає досить тривалі ряди спостережень ВГВ, але має обмежені можливості у вивченні просторових структур хвильових процесів [15].

Ракетні методи не забезпечують досить довгих часових рядів і не дають інформації про горизонтальну структуру коливань, хоча досить точно описують вертикальну структуру рухів [14].

Вивчення часових рядів світіння нічного неба при просторовому скануванні фотометрів дозволяє вивчати горизонтальні структури хвильових процесів, але не дають достатню інформацію про висоту спостережуваних шарів [14, 16].

Спостереження сріблястих хмар (СО) дають прямі докази наявності хвильових рухів у верхній атмосфері. СО, що утворюються у високих широтах на висоті мезопаузи, характеризуються структурами, які можуть бути віднесені тільки до хвильових або коливальних [17].

Вивчення фотографій СО дає унікальну можливість вивчати горизонтальну структуру рухів на площах приблизно 10^5 км² протягом декількох годин.

За спостереженнями СО зроблені висновки [17], що нерегулярні вітри в області нижньої термосфери обумовлені суперпозицією хвильових і турбулентних рухів, причому переважають хвильові рухи.

Хвильові рухи поділяються на рухи, викликані поширенням ВГВ і дрібномасштабними коливаннями, які обумовлені акустичними хвилями з малими часами життя через сильну дисипацію або нестійкості в спостережуваній області.

Для отримання більш повної інформації про механізми виникнення і поширення хвиль необхідні дані про висотної структурі цих процесів і ще більш тривалі ряди спостережень СО [17].

Серед методів вимірювання параметрів ВГВ особливе місце займає метод лідарного зондування атмосферного натрію на висотах 80 - 100 км. На цих висотах постійно є природний натрій з концентрацією, достатньою для впевненого вимірювання сучасними лідарними системами. Зростання амплітуди хвильових процесів в атмосфері зі збільшенням висоти і досягнення максимальних

значень на висотах близько 100 км призводить до помітної модуляції щільності натрію [14]

Технічні характеристики лідарних систем дозволяють вивчати вертикальні профілі натрієвого шару, модульованого хвильовими процесами, з високим просторовим і тимчасовим дозволом, а мобільність лідарних систем і автоматизація їх управління дозволяють створювати мережі наземних лідарних станцій для вивчення просторових структур ВГВ.

Збільшення інформативності лідарного методу вимірювання параметрів ВГВ досягається введенням кутового сканування променю лідарної системи. При цьому здійснюється сканування в трьох - чотирьох точках простору, рознесених на відстань, порівняно з довжиною хвилі досліджуваних процесів, тобто 20 - 70 км.

Проводячи спільну обробку результатів зондування по всіх точках сканування, можна обчислити істинний вектор поширення фази хвильового процесу, тобто визначити напрямок на джерело ВГВ.

2.5 Аналіз структури метеорологічних лідаров і вхідних сигналів приймальних систем

2.5.1 Метеорологічні лідарні системи, які вирішують широке коло завдань метеорологічної лазерної локації, мають досить загальні структурні схеми [1-7]. Основними характеристиками метеорологічних лідаров є: дальність дії, роздільна здатність, точність вимірювання визначених параметрів, час вимірювання, час, необхідний для обробки первинної інформації і ін. На відміну від радарів ефективність застосування лідаров залежить від часу доби, оскільки величина фонові засвітці приймача лідара (розсіяний в атмосфері світло Сонця, Місяця, зірок, світіння нічного неба) значно змінюється протягом доби. Підвищення ефективності роботи МЛ досягається за рахунок статистичних методів обробки результатів вимірювання на ЕОМ.

Основні параметри квантових генераторів, що використовуються в якості передавачів МЛ - енергія випромінювання в імпульсі, частота і ширина смуги випромінювання, кут розходження - входять в рівняння лазерної локації [1] і поліпшення цих параметрів дозволяє підвищити ефективність МЛ систем.

Створення перестроюваних лазерів з високою спектральною яскравістю, становить значні труднощі і для досягнення рекордних параметрів вимагає великих матеріальних і технологічних витрат, а також енергетичних ресурсів.

Економічно збільшення цих витрат може бути виправдано, якщо є подальше поліпшення параметрів приймальні системи - зменшення коефіцієнта втрат оптичної системи, збільшення площі приймального телескопа і квантового виходу фотоприймача.

Оптимізація за критерієм вартість/якість визначає наступні параметри лідарної системи, призначеної для локації атмосферного натрію на висоті 80 - 100 км за методом резонансного розсіювання в нічний час доби:

- енергія випромінювання лазера в імпульсі 0,5 - 3 Дж;
- діаметр приймального телескопа 0,8 - 1,5 м;
- квантовий вихід ФЕП 2 - 10%.

2.5.2 Для досягнення необхідної точності вимірювання метеорологічних параметрів інформація, яка надходить з виходу фотоелектронного перетворювача, обробляється в приймальному пристрої з урахуванням параметрів статистичного розподілу лідарного сигналу.

Апріорні відомості про параметри сигналу можна отримати, враховуючи особливості функціонування лідарних систем [1]:

- апріорі відомий об'єкт інформаційної взаємодії (для атомарного натрію за результатами ракетних і сутінкових спостережень відома стратифікаційна модель і орієнтовна концентрація [1]);
- зазначені параметри дозволяють ще до початку зондувань оцінити величину відбитого сигналу по рівнянню лазерної локації [1].

- у більшості випадків можна вважати, що об'єкт інформаційної взаємодії (домішок атмосфери) за час одного циклу вимірів нерухомий, а статистичні характеристики сигналу (математичне очікування, дисперсія, закон розподілу) незмінні [1].

Методики вимірювання метеорологічних параметрів лідарного системами засновані на виміру енергії розсіяного оптичного випромінювання є відомими [1]. Тому точність вимірювання метеопараметрів знаходиться в прямій залежності від точності вимірювання енергії відбитого сигналу.

В даний час найбільш енергетично чутливим приймачем оптичного діапазону є фотоелектронний помножувач (ФЕП) [18]. Кількість квантів енергії, що падає на фотокатод ФЕП, визначає число струмових імпульсів на аноді ФЕП. Ця залежність має статистичний характер і, в загальному випадку, може бути виражена негативно-біноміальним законом розподілу [18].

Статистичний характер сигналу на виході фотоприймача, а також наявність шумової перешкоди, обумовленої тепловими шумами ФЕП і фоновим засвітленням, є основними джерелами випадкових помилок вимірювання енергії лазерного випромінювання [18].

Максимальна чутливість ФЕП реалізується в режимі «лічення фотонів». При цьому струмові імпульси на аноді ФЕП можна розділити на три групи:

- поодинокі фотоелектрони формують на аноді ФЕП струмові імпульси, амплітуда яких визначається коефіцієнтом посилення всіх діодов [18];
- шумові імпульси, викликані процесами, що відбуваються в діодній системі, включаючи термо-, авто- і фотоемісії діодов, які мають меншу амплітуду, оскільки при їх формуванні не в повному обсязі використовуються підсилювальні властивості діодної системи [18];
- найбільш потужні імпульси - «кляцання» - утворюються при ударі іонів по фотокатоду ФЕП та вибиванні декількох електронів, які після посилення діодами утворюють потужний струмовий імпульс.

Зменшенню інтенсивності останніх з перерахованих імпульсів сприяє робота ФЕП в області «плато» лічильної характеристики і зниження напруги на останніх діодах [18].

На рис. 2.1 приведена характеристика амплітудного розподілу імпульсів фотоелектронного помножувача [18].

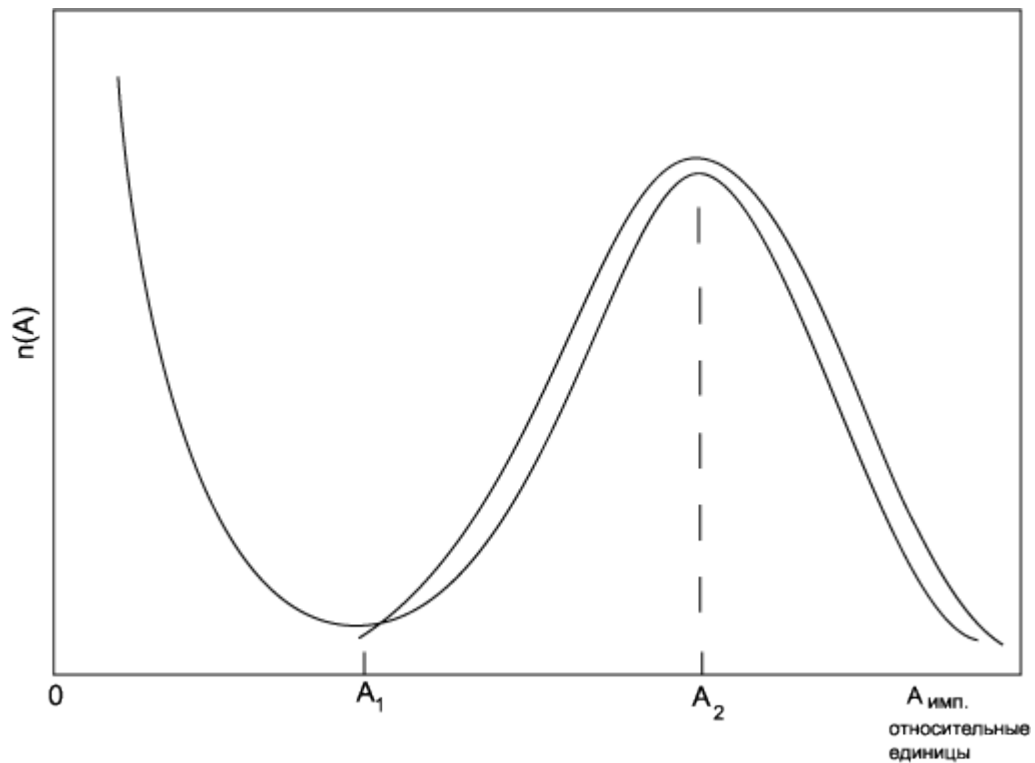


Рисунок 2.2 - Амплітудний розподіл вихідних імпульсів ФЕП (темнова - крива 1, сигнальних - крива 2).

З рис. 2.1 видно, що залежності мають дві виділені точки - A_1 і A_2 . Поведінка функції від 0 до A_1 визначається імпульсами, які виникають в результаті термоемісії електронів з діодів. Ці імпульси мають малу амплітуду, так як посилюються не на всіх каскадах ФЕП. Для $A > A_1$ залежність $n(A)$ має вигляд розподілу Пуассона з середньою амплітудою A_2 .

Виділення одноелектронних імпульсів на тлі діодних шумів здійснюється амплітудним селектором [1, 18]. Оптимальний поріг дискримінації за амплітудою встановлюється в точці A_1 характеристики амплітудного розподілу

імпульсів ФЕП. Таким чином, амплітуда селектор не пропустить імпульси з амплітудою $A < A_1$. При цьому імпульсні перешкоди (теплові шуми ФЕП, фонове засвітлення) і одноелектронні імпульси відбитого лазерного сигналу на виході амплітудного селектора мають однакову форму і амплітуду, а число сигнальних імпульсів істотно не зменшується.

2.5.3 В результаті аналізу відомих пристроїв обробки лідарного сигналу [1, 18] визначено алгоритм первинної обробки:

- весь висотний інтервал вимірювання і відповідний йому часовий інтервал розділяється на елементарні часові інтервали усереднення;
- у кожному часовому інтервалі здійснюється накопичення сигнальних імпульсів і імпульсів перешкоди, що надходять з виходу фотоелектронного перетворювача протягом циклу вимірювань;
- у проміжках між імпульсами зондування вимірюється інтенсивність шумової перешкоди, при цьому можливе визначення інтенсивності (математичного очікування) перешкоди з будь-якою, наперед заданою точністю.
- після закінчення циклу вимірювання з сумарного сигналу (сигнал плюс перешкода) в кожному часовому інтервалі віднімається усереднена інтенсивність шумової перешкоди.

Результат обробки в кожному часовому інтервалі містить інформацію про енергію розсіяного оптичного випромінювання з відповідного висотного інтервалу усереднення.

. Рівняння лазерної локації для режиму лічення фотонів має вигляд [1]:

$$N(z) = (\eta \cdot T_A^2) \cdot \left(\frac{E_0}{h\nu} \right) \cdot \sigma_{ef}(\nu) \cdot n_s(z) \cdot \Delta z \cdot \left(\frac{S_{np}}{4\pi z^2} \right) + N_{ш}, \quad (2.1)$$

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 ;

$N_{ш}$ – 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;

Δz – довжина інтервалу дозволу по дальності;

S_{np} – площа апертури приймального телескопа;

ν – частота випромінювання;

h – постійна Планка;

c – швидкість світла;

E_0 – енергія випромінювання передавача;

T_A – однопроходовий коефіцієнт пропускання атмосфери;

η – оптичний ККД лідара, що дорівнює добутку коефіцієнтів пропускання приймальної і передавальної оптики.

Центральна гранична теорема Ляпунова [23] звучить так - якщо випадкова величина X являє собою суму дуже великого числа взаємно незалежних випадкових величин, вплив кожної з яких на всю суму є незначним, то X має розподіл, близький до нормального розподілу. З урахуванням граничної теореми Ляпунова можна вважати, що закон статистичного розподілу результатів накопичення в кожному часовому інтервалі наближається до нормального з дисперсією, яка дорівнює математичному очікуванню результату накопичення.

Після вирахування в кожному часовому інтервалі інтенсивності (математичного очікування) перешкоди математичне очікування результату обробки в кожному часовому інтервалі маємо:

$$(N_c + N_n) - N_n = N_c, \quad (2.2)$$

де $(N_c + N_n)$ - результат накопичення в кожному часовому інтервалі інтенсивності сигналу і перешкоди;

N_c - інтенсивність сигнальних імпульсів в кожному часовому інтервалі;

N_n - інтенсивність перешкоди, виміряна в інтервалах часу між зондування.

Дисперсія результату обробки лідарного сигналу в кожному часовому інтервалі дорівнює:

$$D_p = D_c + D_n, \quad (2.3)$$

де D_p - дисперсія результату обробки;

D_c - дисперсія розподілу сигнальних імпульсів;

D_n - дисперсія розподілу імпульсів перешкоди.

З огляду на, що дисперсії розподілу імпульсів сигналу і перешкоди рівні їх інтенсивностям, введемо середньоквадратичне помилку результату обробки лідарного сигналу:

$$\delta = \sqrt{D_p} = \sqrt{N_c + N_n}. \quad (2.4)$$

При цьому відносна середньоквадратична помилка результату вимірювання енергії лідарного сигналу в кожному часовому (або відповідному йому висотному) інтервалі усереднення дорівнює [42]:

$$\frac{\delta}{N_c} = \frac{1}{\sqrt{N_c}} \sqrt{1 + \frac{1}{g}}, \quad (2.5)$$

де $g = \frac{N_c}{N_n}$ - відношення сигнал/шум.

З формул (2.1) і (2.5) маємо наступне:

- точність вимірювання енергії лідарного сигналу збільшується при збільшенні енергії сигналу;
- при зміні відношення сигнал/шум у великих межах можна досягти заданої точності при збільшенні часу вимірювання з використанням методів алгоритмічної адаптації;
- при обмеженій потужності джерела живлення лідара, що характерно для бортових лідарних систем, можна поліпшити точність вимірювання за рахунок збільшення енергії кожного імпульсу випромінювання лазера (при допустимих втратах дозволу по швидкодії);
- зі збільшенням тимчасових (висотних) інтервалів усереднення поліпшується точність вимірювання при одночасному погіршенні точності дозволу по висоті; досягнення необхідного компромісу вирішується методами параметричної адаптації.

2.5.4 Описаний алгоритм обробки лідарного сигналу визначає структуру приймальної частини лідара [1, 18, 19]. При наявності деяких особливостей побудови пристроїв первинної обробки МЛ можна виділити їх загальні ознаки:

- в момент випромінювання лазера запускається формувач часових інтервалів, який генерує тимчасові «ворота», відповідні висотним інтервалам усереднення;
- потік імпульсів з виходу фотоелектронного перетворювача розділяється на тимчасові інтервали, і в кожному часовому інтервалі підсумовується кількість прийнятих імпульсів;
- результати первинної обробки заносяться в пам'ять ЕОМ для статистичної обробки сигналу і розрахунку метеорологічних параметрів (в деяких випадках можливе застосування проміжного накопичувача на магнітному носії).
- в пам'ять ЕОМ заносяться також інформація про інтенсивність перешкод і коди службової інформації про параметри передавальної і приймальної частини лідара.

2.6 Одноелектронні характеристики фотоелектронні помножувачів (ФЕП)

2.6.1 Джерела шумів ФЕП

В даний час широкого поширення набули фотоелектронні помножувачі (ФЕП), принципи роботи яких, властивості і технологія виготовлення добре описані в літературі. Найчастіше мова йде про завдання реєстрації сигналів, рівень яких перевищує рівень власних шумів ФЕП, що виключає необхідність подолання труднощів, пов'язаних з природою і шумовими властивостями ФЕП.

ФЕП чітко поділяються за цільовим призначенням, наприклад, ФЕП для амплітудного і часового аналізу світлових сигналів. До таких ФЕП висувають вимоги, які одночасно виконати дуже важко.

Сигнали, що надходять ФЕП, створювані окремими фотонами, не відрізняються від сигналів власного шуму ФЕП як по амплітуді, так іноді і по інтенсивності. Тому, при реєстрації гранично слабких світлових потоків або ви-

промінювання просторово-часової кореляції між окремими фотонами, використовують ФЕП з мінімальною величиною їх власного шуму. А ця величина визначається особливостями технологічного процесу при виготовленні ФЕП, які проконтролювати неможливо.

При вивченні шумів ФЕП необхідно розглядати систему в цілому, так як відомостей про шуми фотоелементів і електронних помножувачів недостатньо для опису шумових характеристик ФЕП.

В результаті досліджень, з'ясовано чотири основних джерела виникнення темнових струмів ФЕП:

- термоелектронна емісія фотокатода і діодов;
- струм витоку в анодному колі ФЕП;
- автоелектронна (холодна) емісія електродів;
- струм, обумовлений іонами залишкового газу;
- оптичний зворотний зв'язок;
- вплив космічного випромінювання.

Перераховані джерела темнового струму складають всього лише частину від різноманіття всіляких джерел, що вносять найбільший внесок і не є рівноправними.

Джерела шуму можна розділити на зовнішні і внутрішні, первинні і вторинні, принципово переборні і непереборні. Шум можуть викликати ефект мерехтіння фотокатода і навіть випромінювання радіоактивних атомів, які містяться в конструктивних матеріалах ФЕП.

Відзначимо, що термін «шуми» краще терміна «темнової струм», оскільки він більш точно відображає характер флуктуаційної частини темнового струму, що обмежує чутливість методів вимірювання. Однак, якщо необхідно, вживають обидва терміни.

2.6.2 Порівняльні характеристики ФЕП

2.6.2.1 ФЕП-42, ФЕП-43, ФЕП-1А (умовне позначення ФЕП-42 з 13 каскадами множення і діаметром фотокатода 10 мм). Для окремих зразків ФЕП

число термоелектронів з фотокатода, що реєструються у вигляді одноелектронних імпульсів, сягає $5 - 6 \text{ сек}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$; протяжністю плато не менше 200 В, крутизною його - $0,05\% / \text{В}$; внесок діодної системи і газорозрядних процесів досить малий; охолодження нижче мінус 10°C недоцільно. Спостерігається чіткий одноелектронний пік з $K = 3 \dots 5$.

2.6.2.2 ФЕП-64. Плато лічильної характеристики відсутня, через велику величину термоемісії діодної системи (близько 80% всіх шумів при напрузі живлення 1 кВ); нахил плато лічильної характеристики становить $0,6\% / \text{В}$; число імпульсів для кращих зразків становить $80 - 100 \text{ сек}^{-1}$ з усього фотокатода і $200 - 400 \text{ сек}^{-1}$ для зразків середньої якості.

2.6.2.3 ФЕП-29 (відібрані зразки). Плато лічильної характеристики відсутнє; велика термоемісія діодної системи (близько 40%); значне число імпульсів газорозрядного походження; середнє число шумових імпульсів з усього катода одно $500 - 1000 \text{ сек}^{-1}$. При глибокому охолодженні спостерігається повна втрата чутливості.

2.6.2.3 ФЕП-51. плато лічильної характеристики відсутнє; нахил плато лічильної характеристики порядку $0,25\% / \text{В}$. Внесок термоемісії діодної системи малий (при напрузі живлення 1,8 кВ близько 2%); велике число імпульсів газорозрядного походження (близько 10 - 30%), які деформують одноелектронний розподіл. Середнє число шумових імпульсів з усього катода $1000 - 3000 \text{ сек}^{-1}$.

2.6.2.4 ФЕП-79. Велика термоемісія діодної системи спотворює одноелектронний розподіл (при напрузі живлення 1,4 кВ близько 20%) і пояснює відсутність плато лічильної характеристики. Шуми двох досліджених в роботі ФЕП-79 становили 50 і 180 сек^{-1} .

2.6.2.5 ФЕП з киснево-цезієвим фотокатодом. Досліджували спеціально виготовлені ФЕП для таких фотокатодів, оскільки серійні ФЕП з киснево-цезієвим катодом мають термоемісію більше 10^7 сек^{-1} . Рахункова характеристика досліджених ФЕУ мала плато з крутизною $0,05\% / \text{В}$. Число газорозрядних

імпульсів складало менше 1%. Охолодження вельми ефективно, при мінус 45 °С число шумових імпульсів зменшувалася на три порядки.

2.6.2.6 ФЕП з теллурісто-рубідієвим фотокатодом. Термoeмісія теллурісто-рубідієвих фотокатодів становить 10 електрон / (хв · см²); шумові імпульси обумовлені в основному термoeмісією діодної системи (5 10 сек⁻¹).

Як видно з вищевказаних даних, ФЕП-42, ФЕП-43, ФЕП-1А мають найбільш підходящі характеристики для реєстрації і вимірювання слабких світлових сигналів: наявність одноелектронного максимуму, термоелектронний характер шумів, мінімальне розвиток побічних процесів, стабільність рівня шумів.

Використання методу амплітудної дискримінації дозволяє значно зменшити число шумових імпульсів у ФЕП-64 до 30 - 200 сек⁻¹ при кімнатній температурі, виділити одноелектронні компоненти і успішно застосовувати ці прилади

У решти типів ФЕП характеристики гірше через шкідливий вплив газорозрядних процесів або термoeмісії діодної системи. Вибір матеріалів для фотокатода і діодов, а також конструктивні особливості мають велике значення, але вирішальний вплив справляє технологічний процес виготовлення. На це вказує випадковий характер отримання ФЕП з певними характеристиками, тому доводиться говорити про середні параметри шумових характеристик для кожного типу ФЕП.

Висновки за розділом:

- на підставі аналізу лідарних методів зондування атмосфери можна зробити висновок, що метод резонансного розсіювання є найбільш доцільним для використання досліджень верхньої атмосфери;

- для покращення якості лідарних вимірювань запропоновані три ієрархічних рівня адаптації: алгоритмічний, параметричний і адаптація функціонування МЛ;

- особливу увагу в дослідженнях верхньої атмосфери приділяють натрію, який є відмінним трасером хвильових процесів;
- проаналізований алгоритм первинної обробки лідарного сигналу, що задає вимоги до структури приймальної системи лідару;
- з'ясовано чотири основних джерела виникнення темнових струмів ФЕП, зроблений порівняльний аналіз для застосування у режимі лічення фотонів.

3 РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ТА РОЗРАХУНКИ

3.1 Структурна схема лідару

На рис. 3.1 приведена структурна схема лідару, яка є результатом аналізу та узагальнення різних лідарних систем дослідження верхньої атмосфери резонансним способом.

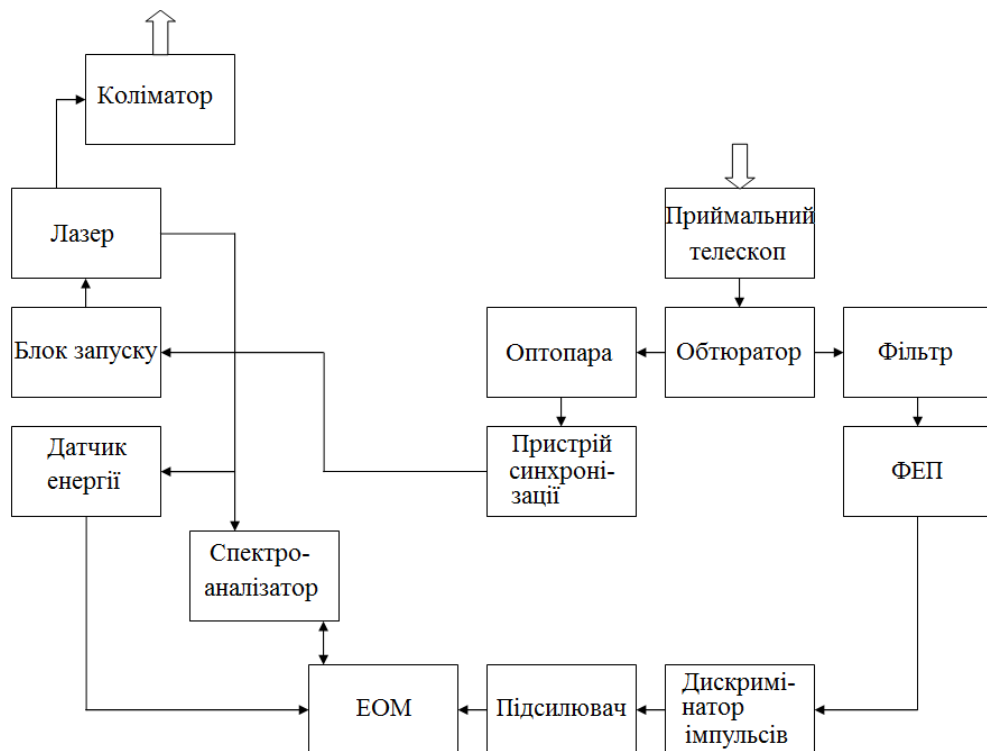


Рисунок 3.1 – Структурна схема лідару

Енергія розсіяного лазерного випромінювання збирається приймальним телескопом, в фокусі якого знаходиться ФЕП з вузькосмуговим інтерференційно-ним оптичним фільтром. Застосовувані фільтри із смугою 0,2 - 1 нм і ви-сокої контрастністю дозволяють знизити інтенсивність шумових імпульсів фонові засвітки в нічний час до рівня теплових шумів. Унікальні лабораторні зразки інтерференційних фільтрів пропускають електромагнітних-нітних ви-промінювання в смузі 0,02 - 0,03 нм, що дозволяє проводити лідарні вимірюва-ння натрієвого шару в світлий час доби [19].

У блоці ФЕП реєстровані фотоелектрони селектують за амплітудою і нормують відповідно до параметрів застосовуваних мікросхем.

У приймально-реєструвальній частині лідару потік імпульсів розділяється по часових інтервалах. Мінімальна величина часових (і відповідних їм висотних інтервалів) визначається тривалістю лазерного імпульсу, що складає 3 - 4 мкс.

Збільшення величини висотних інтервалів обмежене вертикальними розмірами спостережуваних неоднорідностей натрієвого шару і, зокрема, довжиною хвилі атмосферних хвильових процесів. Мінімальний розмір довжини хвилі ВГВ, впевнено вимірюваний лідарними системами на рівні натрієвого шару, становить 3 км [16, 19].

Теорема Котельникова [23] звучить так - будь-яку функцію $f(t)$, що складається з частот від нуля до f , можна відтворити з будь-якою точністю за вибірками, зробленими з інтервалом $\frac{1}{2f}$. Розрахуємо цей інтервал для довжини хвилі ВГВ на рівні натрієвого шару.

Визначимо частоту ВГВ користуючись даними [23], виходячи з формули:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (3.1)$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла;

λ - просторова тривалість ВГВ.

Звідси отримуємо, що частота виборки:

$$f = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^3} = 10^5 \text{ Гц} \quad (3.2)$$

Тоді часовий інтервал вибірки дорівнює:

$$\Delta t = \frac{1}{2 \cdot 10^5} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ с} \quad (3.3)$$

Визначимо висотний інтервал усереднення, відповідний часовому інтервалу вибірки (зондування):

$$\Delta H = \Delta t \cdot c = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8 = 1,5 \cdot 10^3 \text{ м} \quad (3.4)$$

Як видно з проведеного аналізу, величина висотного інтервалу не повинна перевищувати 1,5 км. Ця умова визначає вибір кілометрових висотних інтервалів усереднення.

Протягом кожного часового інтервалу підсумовується кількість вхідних імпульсів в двох лічильниках, що працюють по черзі. Необхідна швидкодія лічильників визначається допустимими втратами інформації за рахунок «злипання» імпульсів ФЕП. Ці втрати не повинні перевищувати рівень «статистичного шуму», який при вимірюванні стандартних метеорологічних параметрів задається не більше 3 - 5%.

Втрати інформації за рахунок обмеженої швидкодії підсумовуючих лічильників визначаються ймовірністю появи двох і більше імпульсів ФЕУ на інтервалі, рівному періоду максимальної швидкодії лічильників, і з урахуванням пуассоновського закону розподілу вхідного сигналу визначаються формулою [23]:

$$P(\geq 2) = \sum_{K=2}^{\infty} \frac{\lambda^K}{K!} e^{-\lambda}, \quad (3.5)$$

де λ - інтенсивність потоку, яка визначається як добуток величини інтервалу максимального швидкодії мікросхем на середню частоту вхідного сигналу;

K - кількість імпульсів, що проходять за час перемикавання лічильників.

В розрахунках використовувались наступні вихідні дані, що отримані з використанням лідарного рівняння та довідкових даних щодо параметрів стандартної атмосфери:

- інтенсивність вхідного сигналу задається середньою частотою f або кількістю імпульсів n в часовому інтервалі 6,67 мкс, що відповідає кіло-метровому висотному дозволу;

- максимальній частоті $f = 15$ МГц, або кількістю імпульсів в кіло-метровому висотному інтервалі рівному 100, відповідає рівень сигналу від нижніх шарів атмосфери;

- частоті сигналу $f = 150$ КГц - 1,5 МГц відповідає інтенсивність сигналу від натрієвого шару з висоти 80 - 100 км.

Результати розрахунку ймовірності «злипання» двох і більше імпульсів для трьох типів мікросхем з урахуванням інтенсивності вхідного сигналу зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення ймовірностей «злипання» імпульсів для трьох типів мікросхем

Тип мікросхем, швидкодія	f=15 кГц	f=150 кГц	f=1,5 МГц	f=15 МГц
ТТЛ, F=15 МГц	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$
ТТЛШ, F=45 МГц	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-2}$
ЕПЛ, F=150 МГц	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$

Наведені в таблиці 2.1 результати вказують на неприпустимо великі втрати інформації при використанні ТТЛ-лічильників. Застосування ТТЛШ лічильників зменшують втрати інформації до рівня «статистичних шумів». Найменші втрати інформації вносять ЕПЛ-лічильники.

2.2.4 Наведений у попередніх розділах аналіз алгоритмів обробки лідарного сигналу і структур пристроїв, що реалізують ці алгоритми, дозволяє виділити основні джерела помилок вимірювання енергії лідарного сигналу:

- статистичний характер сигналу на виході фотоприймача визначає середньоквадратичне помилку, так званий, «статистичний шум» [23]:

$$\frac{\delta}{N_c} = \frac{1}{\sqrt{N_c}}; \quad (3.6)$$

- наявність шумової перешкоди, обумовленої тепловими шумами ФЕУ і фоновій засвіченню, збільшує середньоквадратичну помилку пропорційно множнику K [23]:

$$K = \sqrt{1 + \frac{1}{g}}. \quad (3.7)$$

- втрати інформації за рахунок обмеженого швидкодії підсумовується-чих лічильників визначаються відповідно до даних таблиці 2.1.

- збільшенню помилок вимірювання енергії лідарного сигналу сприяє нестационарний характер зовнішніх впливів: зміни температури, випадкові коливання напруги живлення, впливу нестационарних електромагнітних і радіаційних полів (особливо на ФЕП).

Перші дві помилки є випадковими і не можуть бути зменшені апаратними засобами в пристрої обробки лідарного сигналу.

Третя помилка є систематичною, вона має постійний знак «мінус» і може бути врахованою методами алгоритмічної адаптації. Застосування декількох лічильників для підсумовування імпульсів ФЕП з урахуванням реального розкиду параметрів інтегральних мікросхем за швидкодією вносить додаткові помилки, що в 1,5 рази перевищують значення, наведені в таблиці 2.1; причому ці помилки з'являються і при малої інтенсивності вхідного сигналу, тому що втрати інформації відбуваються не тільки за рахунок «злипання» двох імпульсів з малим часом дозволу, але і за рахунок пропуску одиничних імпульсів з малою тривалістю.

3.2 Вплив геометричного фактору на точність визначення щільності нижніх шарів атмосфери

Відомо, що для отримання висотних профілів щільності атмосфери солідарності способом використовується сигнал зворотного розсіювання [1]. Прийом сигналу зворотного розсіювання здійснюється телескопом з прийомним дзеркалом і розташованим в його фокусі фотоелектронним помножувачем

(ФЕУ), які працюють, як правило, в режимі рахунку фотонів. Стробування по висоті проводиться з дискретністю, обмеженою тривалістю зондуючого імпульсу, а величина відбитого сигналу з кожного висотного інтервалу накопичується за кількома імпульсам у відповідній клітинці дальності [2].

Розсіяний атмосферою сигнал дозволяє отримати висотний профіль атмосферної щільності в інтервалі висот від приземного шару до приблизно 60 км з використанням методики, при якій атмосфера передбачається квазіоднорідною, що підкоряється рівнянню газового стану і знаходиться в гідростатичній рівновазі, тобто атмосферні турбулентності не впливають на середнє значення щільності повітря.

Застосування лідарного рівняння передбачає повне потрапляння обсягу, яке зазнає впливу лазерного випромінювання, в поле зору оптичного телескопа приймача. Використання лідарних систем моностатичної схеми зондування з рознесенням приймача від передавача і із застосуванням механічних систем об'єктивів на вході ФЕУ з кінцевим часом розкриття фотокатода зменшує перевантаження фотоприймача [2]. Однак при такій схемі лідарного рівняння має бути доповнене множником (геометричним фактором), що визначає величину перекриття полів зору приймача і передавача.

Можна показати, що для лідарної системи, що має паралельні осі передавача і приймача, геометричний коефіцієнт залежить від відстані між осями приймача і передавача a , кута огляду приймального телескопа 2α , розбіжність лазерного випромінювання 2β і відстані до зондіруемой шару атмосфери h . Коефіцієнт перекриття враховує площу перекриття діаграми спрямованості передавача та кута зору приймача (рис. 3.2)

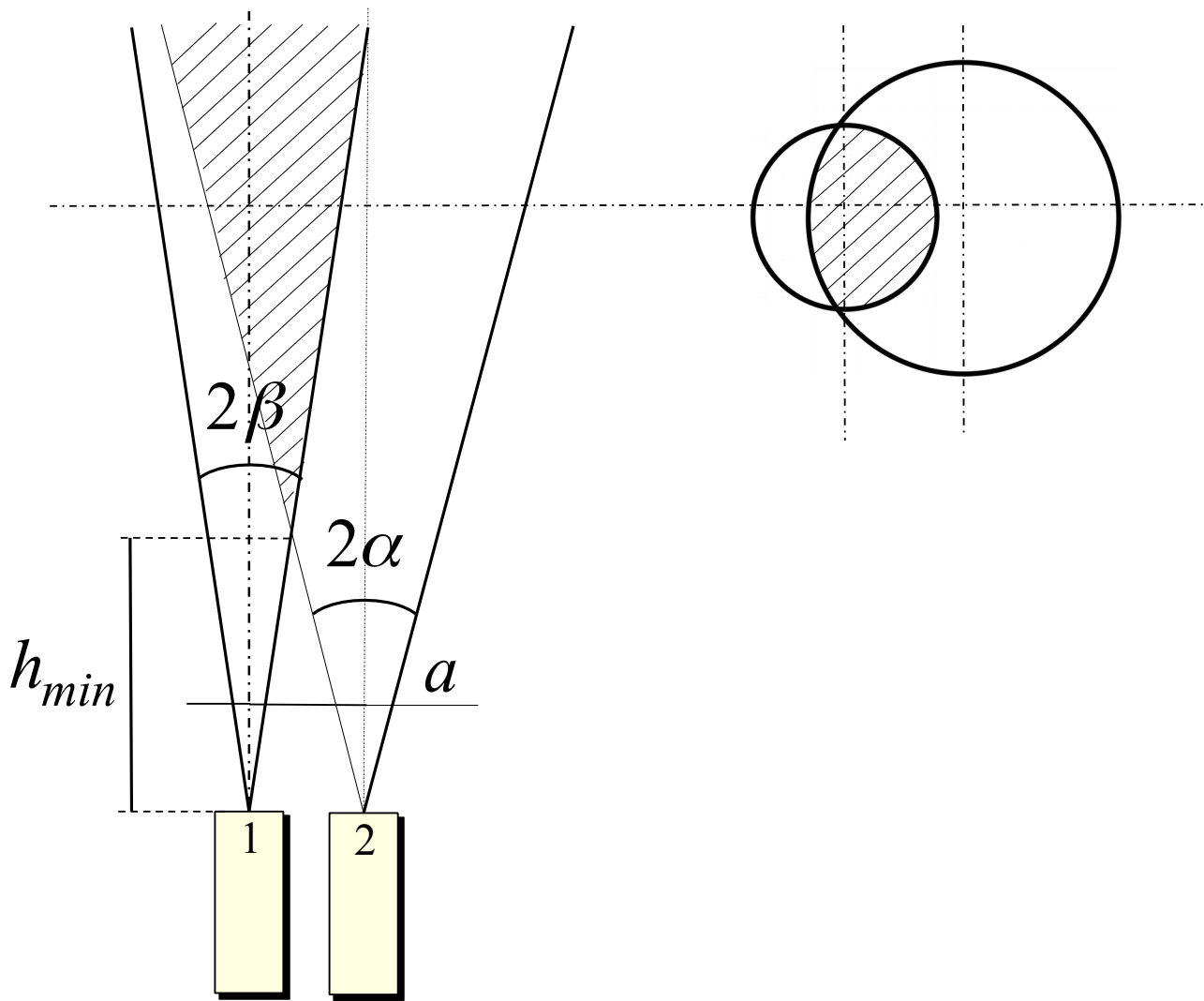


Рисунок 3.2 – Перекриття діаграм спрямованості приймача та передавача (заштрихована область)

Можна показати, що геометричний коефіцієнт γ , що дорівнює відношенню площі перетину променю, що потрапляє в поле зору приймального телескопа, до повного перетину розсіяного випромінювання дорівнює:

$$\gamma = \frac{E}{E_{\max}} = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2 \cdot [\arccos B - B \sin(\arccos B)] + [\arccos C - C \sin(\arccos C)] \right] \quad (3.7)$$

Тут використані позначення: $B = \frac{\chi}{\alpha h}$, $C = \frac{a - \chi}{\beta h}$,

$$\text{де } \chi = \frac{h^2(\alpha^2 - \beta^2) + a^2}{2a}.$$

Розглянемо три характерних випадку:

$h_{min} \leq \frac{a}{\alpha + \beta}$ отримаємо $\gamma = 0$, тобто перекриття поля зору приймача і діа-

грами спрямованості випромінювання передавача відсутнє;

$h_s \geq \frac{a}{\alpha - \beta}$ отримаємо $\gamma = 1$ і повне перекриття поля зору приймача і діа-

грами спрямованості випромінювання передавача;

$\frac{a}{\alpha + \beta} < h < \frac{a}{\alpha - \beta}$ в лідарне рівняння необхідно ввести коефіцієнт, що

розраховується за формулою (3.7).

На рис. 3.3 представлені графіки геометричних коефіцієнтів, що отримані за результатами розрахунків з використанням формули (3.7).

З графіків можна зробити наступні висновки:

- чим більше кут зору приймача порівняно з діаграмою спрямованості передавача, тим раніше спостерігається їх повне перекриття;

- для запобігання перевантаженню ФЕП сигналом з нижніх висот кут діаграми спрямованості передавача має бути близьким до кута зору приймальної системи.

Повне перекриття спостерігається тільки на висотах, які визначаються рі-

внянням $h_{min} \geq \frac{a}{\alpha - \beta}$, а відсутність обліку геометричного фактора на більш низьких висотах не дає можливості з достатньою точністю визначити профіль щільності атмосфери.

З урахуванням геометричного коефіцієнту лідарне рівняння (2.5) має вигляд:

$$N(z) = \gamma \cdot (\eta \cdot T_A^2) \cdot \left(\frac{E_0}{h\nu} \right) \cdot \sigma_{ef}(\nu) \cdot n_s(z) \cdot \Delta z \cdot \left(\frac{S_{np}}{4\pi z^2} \right) + N_{ш}. \quad (3.8)$$

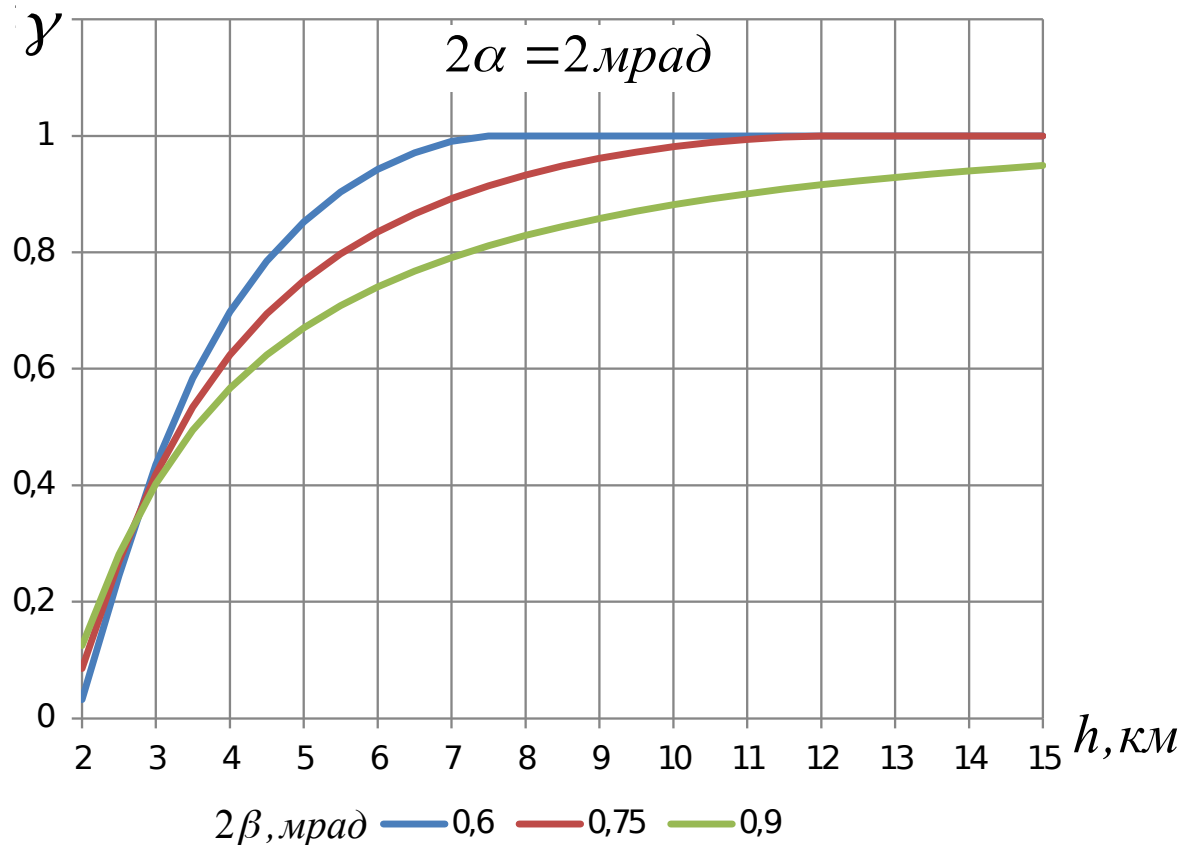


Рисунок 3.3 – Графіки геометричних коефіцієнтів в залежності від висоти при різних співвідношеннях кутів діаграм передавача та приймача

При зондуванні домішків, що розташовуються у верхній атмосфері, зазвичай, нехтують сигналами, які потрапляють з нижніх висот атмосфери. Але ж при цьому ігнорується цінна супутня інформація про щільність атмосфери, з якої можна, наприклад, визначити вміст аерозолів у тропосфері.

Використання геометричного коефіцієнту в лідарному рівнянні дозволяє усунути цей недолік.

Якщо точно виміряні діаграма спрямованості передавача та кут зору приймальної системи і вісі їх є паралельними, то облік геометричного фактору за формулою 3.2 не має жодних проблем.

Однак в умовах реальних лідарних досліджень атмосфери погрішність взаємного юстування приймально-передавальної оптики має кінцеве значення. Це системна похибка, що має постійне значення і її можна знехтувати точним вимірюванням кута між вісями оптичних систем передавача та приймача.

Випадок непаралельності вісів легко врахувати, якщо увести в рівняння (3.2) змінну величину відстані між вісями, що обчислюється за формулою:

$$a = h \cdot \varphi,$$

де φ – кут між вісями.

При цьому знак «-» відповідає сходженню вісей, «+» - розходженню.

На точність оцінки геометричного коефіцієнту також впливає нестабільність кута випромінювання лазера, яка обумовлена нестаціонарними процесами в активному елементі, а також неоднорідністю накачування.

Ця похибка має випадковий характер і не може бути скорегована методами параметричної адаптації.

На рис. 3.4 представлена відносна похибка розрахунку геометричного коефіцієнту при двох протилежних значеннях непаралельності вісей передавача та приймача.

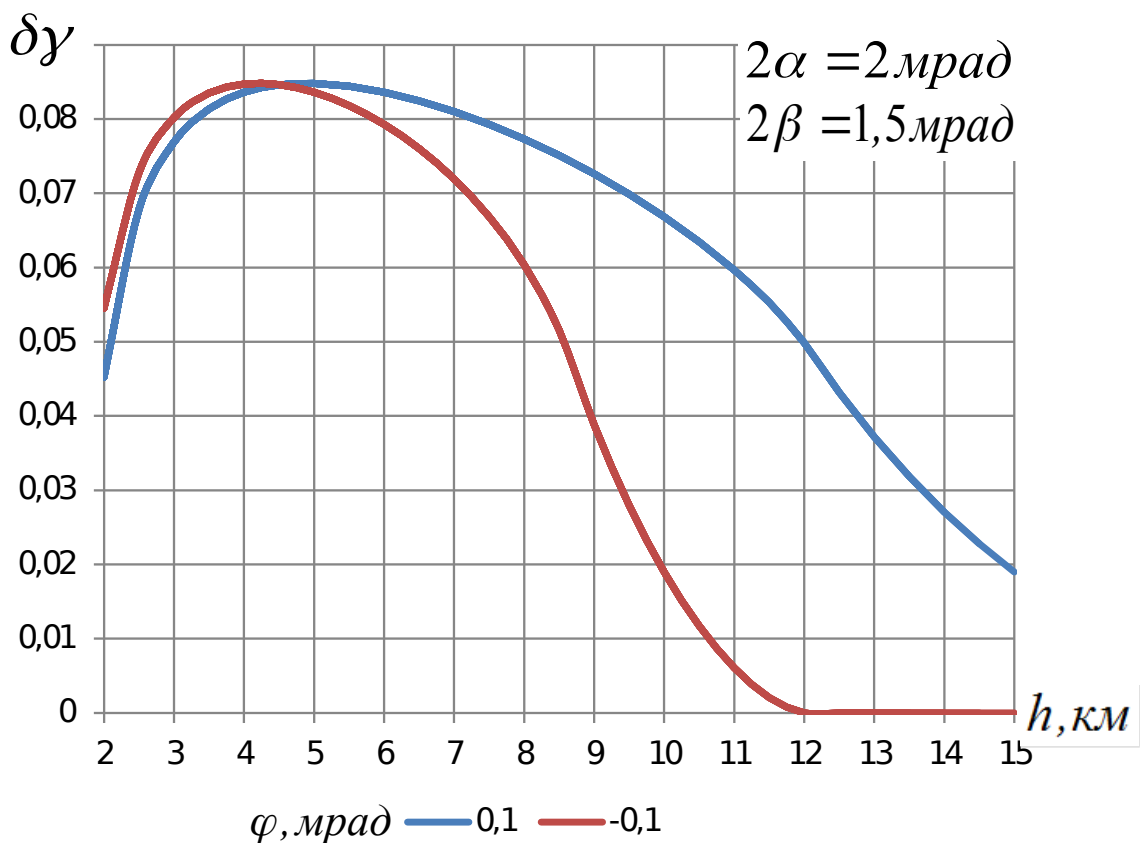


Рисунок 3.3 – Графіки похибки визначення геометричних коефіцієнтів при різних кутах між вісями приймача та передавача

З рисунку можна зробити наступні висновки:

- похибка є меншою у тому випадку коли погрішність юстування вісей приймача та передавача відповідає їх сходженню;
- максимальне значення похибки сягає свого максимального значення у нижній частині висотного діапазону.

Висновки за розділом

- на підставі всебічного аналізу резонансних лідарних систем запропонована структурна схема лідару;
- обгрунтовано інтервал висотного дозволу, що дорівнює 1 км, для спостереження хвильових явищ у верхній атмосфері;
- розглянуто вплив геометричного фактору на точність виміру щільності атмосфери на нижніх висотах. Чисельні розрахунки показали, що похибка зменшується, якщо погрішність юстування вісей приймача та передавача відповідає їх сходженню

ВИСНОВКИ

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

- проведений аналіз показав, що застосування метеорологічних лідарних систем з урахуванням їх основних властивостей - безконтактності, дистанційності, швидкодії і високої просторової роздільної здатності дає можливість комплексно вивчати практично всі метеопараметри і термодинамічні процеси в атмосфері і на якісно новій основі підійти до вирішення таких важливих завдань, як довгострокове прогнозування погоди, контроль впливу на навколишнє середовище та ін.:

- на основі проведеного системного аналізу метеорологічних лідаров (МЛ) визначена узагальнена структура автоматизованої системи обробки сигналу висотного лідара з використанням методів адаптивного управління функціонування системи і алгоритмічної адаптації результатів експерименту;

- на основі аналізу методів і пристроїв обробки лідарного сигналу показано, що можна істотно зменшити помилки вимірювання метеорологічних параметрів за рахунок виділення і усунення джерел систематичних і методичних помилок на етапі синтезу структур систем обробки лідарного сигналу і розрахунку їх параметрів;

- розглянуто характеристики ФЕП, одноелектронний режим їх роботи, обґрунтовані вимоги, що пред'являються до фотоелектронних помножувачів;

- на підставі проведених розрахунків геометричного коефіцієнту визначено шляхи зменшення похибки вимірювань щільності тропосфери.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Захаров В.М., Костко О.К. Метеорологическая лазерная локация.- Л.:Гидрометеиздат, 1977.-222с.
2. Зарудный А.А., Плетенев В.Г., Верхоробин А.Л. Лазер повышенной спектральной яркости для исследования атмосферы / / Радиотехника. 1998. Вып. 102. С. 170-175.
3. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере.-М.:Сов. радио, 1970.-496 с.
4. Костко О.К., Смирнов Н.Л., Фадеев В.В. О возможностях измерения плотности стратосферного озона лазерным локатором.-Квантовая электроника, 1976, т.3, с. 2392-2398.
5. Ультрафиолетовый лидарный озонметр./В.П. Гусаров, А.П.Прохоров, Н.Л. Смирнов, А.А. Торба и др.-В сб.: Тез. докл. 6-го Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч.2.-Томск, 1980, с. 6-8.
6. Иваненко Б.П. Интерпретация данных внеатмосферного лазерного зондирования концентрации озона.-В сб.: Тез. докл. 8-го Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч.1.-Томск, 1984, с. 200-203.
7. Тулинов Г.Ф., Дудолодов Ю.Г., Иванов М.С. Исследование динамики полярной мезосферы методом лазерной локации.-В сб.: Тез. докл. 3-го Всесоюзного совещания по исследованию динамических процессов в верхней атмосфере.-Обнинск, 1979, с. 8-9.
8. Петров А.В., Яковлев А.А. Анализ и синтез радиотехнических комплексов. /Под ред. В.Е. Дулевича.-М.:Радио и Связь, 1984.-248 с.
9. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. /Под ред. Г.С. Голицына.-М.:Мир, 1978.-532 с.

10. Казанников А.М., Портнягин Ю.И. Исследования внутренних гравитационных волн радиометеорным методом.-В сб.:Тез. докл. 3-го Всесоюзного совещания по исследованию динамических процессов в верхней атмосфере.-Обнинск, 1979, с.39.
11. Красовский В.И. Итоги исследования ВГВ оптическими методами.- В сб.:Тез. докл. 3-го Всесоюзного совещания по исследованию динамических процессов в верхней атмосфере.-Обнинск, 1979, с.2.
12. Александрович Б.В., Гришин Н.И. Серебристые облака.-М.:Наука, 1970.-360 с.
13. Одноэлектронные фотоприёмники. /С.С. Ветрохин, И.Р. Гулаков, А.Н. Перцев, И.В. Резников.-М.:Атомиздат, 1979.-192 с.
14. Лагутин М.Ф., Кузнецов В.Н., Торба А.А. Многоканальное приёмное устройство.-В сб.: Тез. докл. 1-го Всесоюзного симпозиума по зондированию верхней атмосферы.-Тбилиси, 1975, с. 75-76.
15. Система приёма, отображения и подготовки данных лидара для обработки на ЭВМ. /М.Ф. Лагутин, В.Н. Кузнецов, А.А. Торба и др.-В сб.: Тез. докл. 4-го Всесоюзного симпозиума по лазерному зондированию атмосферы.-Томск, 1976, с. 242-245.
16. Алексеенко А.Г., Галицин А.А., Иванников А.Д. Проектирование радиоэлектронной аппаратуры на микропроцессорах: Программирование, типовые решения, методы отладки.-М.:Радио и связь, 1984.-272 с.
17. Перцев А.Н., Писаревский А.Н. Одноэлектронные характеристики ФЭУ и их применение.-М.:Атомиздат, 1979.-77 с.
18. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике.-М.:Астрель, 2006.-991 с.
19. Кашеваров В.Л., Павлюченко Л.Н., Сокол Г.А. Кремниевые детекторы с внутренним усилением.-М.:ФИАН, 1994.
20. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование: Пер. с англ. – М: Мир, 1987. – 550 с.

21 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