

Б.В. ПЕРЕЛИГІН
О.І. ВЕЛИКА

МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Конспект лекцій



Одеса
«ТЕС»
2012

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Одеський державний екологічний університет

***Присвячується 80-річчю Одеського державного
ЕКОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ***

Б.В. ПЕРЕЛИГІН
О.І. ВЕЛИКА

**МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Конспект лекцій



Одеса
„ТЕС”
2012

ББК 30.15
П 27
УДК 551.501.8

Друкується за рішенням Вченої ради Одеського державного екологічного університету (протокол № 9 від 27.10.11р.)

Перелигін, Борис Вікторович
П 27 Методи дистанційного зондування навколишнього середовища:
Конспект лекцій./ Перелигін Б.В, Велика О. І.; Одеськ. Держ. Екологічний
Університет.– Одеса, ТЕС 2012. – 180 с.

В конспекті лекцій розглянуті питання фізичних та технічних основ наземного дистанційного зондування навколишнього середовища; наводяться параметри та характеристики методів і засобів дистанційного зондування; викладено основи обробки радіолокаційних сигналів в гідрометеорологічних цілях; розглядаються питання використання даних дистанційного зондування навколишнього середовища в інтересах гідрометеорології. Також приділено увагу розгляду питань використання сучасних технічних засобів для одержання та обробки інформації.

Даний конспект лекцій призначений для студентів і магістрів гідрометеорологічного профілю.

ISBN 9780966-2389-71-5

© Одеський державний
екологічний університет, 2012

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	5
1 Основи радіолокації	8
1.1 Принципи радіолокації.....	8
1.2 Способи радіолокаційного спостереження та огляду.....	9
1.3 Вимірювання координат об'єктів.....	11
1.4 Види радіолокаційних станцій.....	16
1.5 Характеристики і параметри радіолокаційних станцій.....	26
2 Основи радіометеорології	32
2.1 Основні електрофізичні характеристики атмосфери і їх зв'язок з метеорологічними параметрами атмосфери.....	32
2.2 Взаємодія електромагнітних хвиль з атмосферою.....	36
2.3 Рівняння радіолокації метеорологічних цілей.....	47
3 Радіолокаційне зондування навколишнього середовища	52
3.1 Імпульсні метеорологічні радіолокаційні станції.....	52
3.2 Радіолокаційне зондування навколишнього середовища за допомогою імпульсних радіолокаційних станцій.....	58
3.3 Радіолокаційне зондування навколишнього середовища за допомогою доплерівських радіолокаційних станцій.....	63
3.4 Зондування навколишнього середовища за допомогою радіолокаційних поляриметрів.....	67
4 Радіотехнічне зондування гроз і верхньої атмосфери	72
4.1 Загальні відомості про грозові розряди.....	72
4.2 Вимірювання дальності до гроз радіотехнічними методами.....	75
4.3 Радіозондування іоносфери.....	82
5 Лазерне зондування навколишнього середовища	88
5.1 Принцип дії і конструкція лазерів і лідарів.....	88
5.2 Взаємодія лідарного сигналу з навколишнім середовищем.....	99
5.3 Вимірювання параметрів навколишнього середовища лідарними методами.....	101
6 Мікрохвильове зондування навколишнього середовища	106
6.1 Основні поняття про радіотеплове випромінювання.....	

навоколишнього середовища і його характеристики.....	106
6.2 Технічні засоби мікрохвильового зондування.....	112
6.3 Дослідження навоколишнього середовища за допомогою радіометрів.....	115
7 Акустичне і радіоакустичне зондування навоколишнього середовища.....	117
7.1 Акустичне зондування.....	117
7.2 Радіоакустичне зондування.....	121
8 Аерологічне зондування.....	126
8.1 Предмет, задачі і зміст аерології.....	126
8.2 Методи досліджень вільної атмосфери.....	132
8.3 Методи вимірювання швидкості та напрямку вітру.....	133
8.4 Устаткування для аерологічного зондування.....	140
9 Аерологічне радіозондування.....	144
9.1 Принципи радіозондування і класифікація систем радіозондування.....	144
9.2 Система радіозондування „Малахіт”.....	145
9.3 Система радіозондування „Метеор” („Метеорит”).....	148
9.4 Система радіозондування АВК-1 („Титан”).....	148
9.5 Система радіозондування „Радіотеодоліт-УЛ”.....	158
10 Спеціальні методи зондування навоколишнього середовища.....	162
10.1 Актинометричне зондування.....	162
10.2 Озонметричне зондування.....	166
10.3 Аеростатне зондування.....	169
10.4 Літакове зондування.....	173
Література.....	178

Вступ

Предмет і задачі дисципліни „Методи дистанційного зондування навоколишнього середовища”. Дані про стан атмосфери, хмарності, поверхні суші та океану мають велике практичне значення у господарській діяльності. Щоденно проводиться більш як 100 тисяч спостережень за ситуацією біля поверхні Землі і приблизно 20 тис. спостережень за станом верхніх шарів атмосфери та поверхневих вод суші, морів та океанів. Важливим є поліпшення аналізу та прогнозу погодоутворюючих процесів.

Використання дистанційного зондування навоколишнього середовища є актуальним для гідрометеорологів та спеціалістів суміжних професій. В наш час розроблено різні типи гідрометеорологічних станцій, котрі вимірюють цілий комплекс показників: температура повітря, атмосферний тиск, вологість, опади, відстань до нижньої межі хмар, дальність метеорологічної видимості, наявність грозових хмар тощо.

Радіолокаційні методи дистанційного зондування базуються на можливості отримання радіолуни від частинок хмар та опадів.

При отриманні відбитих сигналів спостерігається певний зв'язок цих сигналів з мікроструктурою хмар та опадів; інтенсивності та розміру радіолуни з розмірами атмосферних метеоутворювань. У межах дії одного радіолокатора – до 400 км можна отримати радіолокаційні характеристики явищ погоди – просторовий розподіл хмар, швидкість та напрям вітру, показники вологості та опадів та інші метеодані.

Радіолокаційні методи дистанційного зондування навоколишнього середовища дають можливість практично миттєво охоплювати великі об'єми простору та „просвічувати” усі товщі хмар. Спостереження радіолокаційними методами може відбуватися цілодобово та інформація отримується майже миттєво. Важливим фактором є те, що маючи інформацію від мережі метеорологічних локаторів про просторово-часові зміни значень відбивань та послаблень хмарних полів можна не лише визначити стан атмосфери на дану мить, але і прогнозувати розвиток певних метеорологічних явищ та процесів у часі та просторі. До дистанційних методів зондування відноситься також зондування атмосфери за допомогою радіозондів, що несе на собі значну точність та інформативність.

Використання системи активного зондування з активною відповіддю, крім вимірювання температури, вологості та визначення вітрових характеристик, дає можливість розширити коло задач. Спеціальні радіозонди визначають мікроструктуру хмар, радіацію, озоніві характеристики, електронні явища та працюють у діапазоні температур від -30 до +80° С; відносної вологості від 0 до 100%; тиску у великих межах. Радіолокаційні станції є складовою частиною температурно-вітрового зондування та забезпечують його проведення в будь-яких погодних

умовах і у будь-який час доби з однаковою ефективністю.

Дистанційне зондування є невід'ємною складовою частиною при отриманні гідрометеорологічної інформації.

Поглиблення та розширення знань студентів з основ теорії прямих та непрямих дистанційних методів визначення метеорологічних величин необхідно для грамотної обробки та аналізу інформації.

Дисципліна „Методи дистанційного зондування навколишнього середовища” вивчає радіофізичні характеристики атмосфери та їхній зв'язок з метеорологічними параметрами, а також розглядає фізичні основи та головні принципи одержання інформації дистанційними методами з використанням сучасних технічних засобів та методи обробки та інтерпретації цієї інформації.

Структура дисципліни, порядок її вивчення, практична значущість та зв'язок з іншими дисциплінами. Дисципліна „Методи дистанційного зондування навколишнього середовища” є вибірковою дисципліною підготовки бакалаврів за напрямком „Гідрометеорологія” та відноситься до циклу професійної та практичної підготовки (цикл В).

Мета дисципліни – підготовка фахівців-метеорологів в галузі дистанційних методів зондування навколишнього середовища; обробки, інтерпретації та практичного використання інформації, що отримана внаслідок цього зондування.

Після вивчення дисципліни студент повинен мати наступні базові:

Знання:

- основ теорії дистанційних методів зондування атмосфери,
- основ радіолокації та радіометеорології,
- основ аерології та аерологічного зондування,
- спеціального зондування навколишнього середовища,
- сучасних систем радіозондування навколишнього середовища,
- радіолокаційного і радіотехнічного зондування довкілля,
- лазерного, мікрохвильового, акустичного та радіоакустичного зондування навколишнього середовища,

Дисципліна „Методи дистанційного зондування навколишнього середовища” базується на вивченні таких дисциплін, як: „Фізика”, „Вища математика”, „Геофізика”, „Фізика атмосфери”, „Методи гідрометеорологічних вимірювань”.

В свою чергу, вона є основою для вивчення дисциплін „Радіометеорологічний моніторинг”, „Супутниковий моніторинг”, „Синоптична метеорологія”.

Основне вивчення дисципліни здійснюється на лекційних та практичних заняттях.

Закріплення навчального матеріалу здійснюється студентами самостійно відповідно до завдань на самостійну роботу студентів (СРС), на

практичних заняттях, а також в процесі проходження навчального чергування та практики.

Під час вивчення дисципліни проводиться модульний контроль. Модуль навчальної дисципліни – це логічний розділ програми навчальної дисципліни, котрий формує певні знання та вміння. Головною метою модульного контролю є підвищення якості навчання студентів шляхом активізації навчальної діяльності (насамперед, самостійної роботи студентів - СРС), стимулювання ритмічної СРС протягом усього семестру та визначення кількісних критеріїв якості засвоєння окремих блоків (модулів) навчальної дисципліни та ритмічного виконання графіку навчального процесу. Метою модульного контролю також є перевірка знань студентів як у процесі навчання (поточний контроль), так і наприкінці семестру.

Методично модульний контроль з кожного теоретичного модуля здійснюється у формі письмової контрольної роботи. Кожному студенту надається свій варіант контрольного завдання. Результати роботи оформлюються на окремому аркуші відповідно до наступного зразка:

Контрольна робота

з дисципліни „Методи дистанційного зондування навколишнього середовища”

студента групи... прізвище, ім'я, по-батькові студента

Варіант №

1 Заняття

Відповідь

2 Заняття

Відповідь

Дата

Підпис

Час, що виділяється на виконання контрольної роботи, визначається при видачі завдання, залежить від складності завдання і не перевищує 1 академічної години.

Методично модульний контроль з практичних модулів проводиться у формі усного опитування по кожній практичній роботі.

Методичне забезпечення дисципліни вказане в переліку літератури.

1 Основи радіолокації

1.1 Принципи радіолокації

Радіолокація – це область сучасної радіотехніки, що займається виявленням і дослідженням об'єктів за допомогою радіотехнічних засобів шляхом використання відображених (перевипромінюваних) об'єктив високочастотних сигналів або їх власного радіовипромінювання.

Процес виявлення і дослідження об'єктів, а також визначення їх місцезнаходження за допомогою радіотехнічних засобів називається **радіолокаційним спостереженням**.

Об'єкти спостереження радіолокації носять назву **радіолокаційних цілей**.

Інформація, яка отримана в процесі радіолокаційного спостереження, називається **радіолокаційною інформацією**.

Радіотехнічні прилади, за допомогою яких здійснюються радіолокаційні спостереження, отримали назву **радіолокаційних станцій (РЛС)** або радіолокаторів.

Джерелом **радіолокаційної інформації** є сигнал, що формується в процесі радіолокаційного спостереження.

Електромагнітна хвиля – це сукупність електричного та магнітного полів, що поширюються у просторі впродовж часу.

В основі радіолокаційного спостереження лежать наступні **властивості електромагнітних хвиль**:

- електромагнітні хвилі утворюються лише зарядами, що рухаються;
- швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль у вакуумі дорівнює $3 \cdot 10^8$ м/с, швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль в атмосфері теж вважають рівною $3 \cdot 10^8$ м/с;
- якщо в даній точці простору виникло змінне електричне поле, воно породжує в сусідніх точках навкруги себе змінне магнітне поле; це змінне магнітне поле породжує в сусідніх точках змінне електричне поле і так надалі. Так відбувається розповсюдження хвилі в просторі;
- електромагнітні хвилі є поперечними; у них вектор напруженості магнітного поля H та вектор напруженості електричного поля E лежать у площині, що перпендикулярна напрямку розповсюдження самої хвилі;
- віддзеркалення хвиль від об'єктів, фізичні властивості яких відрізняються від властивостей навколишнього середовища;
- прямолінійність розповсюдження хвиль в однорідному середовищі;
- заломлення хвилі на границі розподілу двох середовищ з різними фізичними властивостями;
- поляризація електромагнітних хвиль;

- дифракція електромагнітних хвиль;
- інтерференція хвиль;
- можливість концентрувати випромінювання і прийом електромагнітних хвиль у вузьких секторах.

1.2 Способи радіолокаційного спостереження та огляду

Залежно від процесу формування сигналу радіолокації розрізняють наступні **способи спостереження у радіолокації** (рис. 1.1):

- спостереження радіолокаційних цілей по відбитим сигналам (активна радіолокація з пасивною відповіддю);
- радіолокаційні спостереження з активною відповіддю (активна радіолокація з активною відповіддю – перевипромінювання);
- радіолокаційні спостереження при прийомі власного теплового радіовипромінювання об'єктів (пасивна радіолокація).

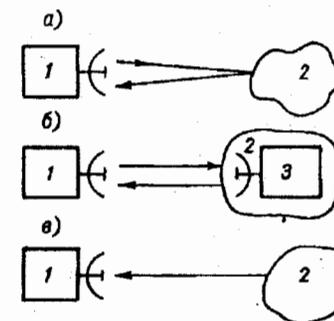


Рис. 1.1 – Способи радіолокаційного спостереження
а – з пасивною відповіддю; б – з активною відповіддю; в – при прийомі власного радіотеплового випромінювання об'єктів; 1 – РЛС, 2 – ціль, 3 – відповідчак

У випадку радіолокаційного спостереження **по відбитим сигналам** радіолокаційна станція випромінює високочастотні коливання (зондовні сигнали), які відбиваються ціллю і приймаються приймачем РЛС. У метеорології цей спосіб спостереження радіолокації використовується для дослідження хмар, опадів і деяких інших метеорологічних об'єктів.

Радіолокаційне спостереження з **активною відповіддю** характеризується тим, що зворотній сигнал, який приймається приймачем РЛС, формується в результаті перевипромінювання за допомогою спеціального відповідчак, який встановлений на цілі. При такому способі

радіолокаційного спостереження істотно підвищуються дальність і контрастність спостереження в порівнянні з спостереженням з пасивною відповіддю (при однакових потужностях передавача і чутливості приймача РЛС). У метеорології такий спосіб радіолокаційного спостереження реалізується в системах радіозондування і ракетних комплексах: радіолокаційна станція є елементом наземної апаратури, а відповідач разом з радіозондом (вимірювальною апаратурою системи радіотелеметрії) поміщається на кулі-зонді або ракеті. Наземна РЛС посилає в напрямку на радіозонд високочастотні сигнали „запиту”, які приймаються прийомопередавачем і перевипромінюються назад в напрямку радіолокатора, де і приймаються приймачем.

Радіолокаційні спостереження, при яких використовуються *власне теплове радіовипромінювання* об'єктів, здійснюються в даний час тільки в сантиметровому та міліметровому діапазонах хвиль. Це пов'язано з тим, що радіовипромінювання об'єктів обумовлене їх тепловим випромінюванням, спектральна щільність якого зменшується з зменшенням частоти сигналів. РЛС, які використовують власні радіовипромінювання об'єктів в НВЧ-діапазоні, називаються НВЧ-радіометрами. За допомогою радіометрів можливо тільки визначення напрямку на ціль і неможливо вимірювання дальності, відтоді як при радіолокаційному спостереженні з пасивною і активною відповіддю можливе визначення кутових координат і дальності.

У метеорології радіолокаційне спостереження з використанням власного радіовипромінювання об'єктів реалізуються при радіолокаційному огляді земної поверхні і хмарності з штучних супутників Землі (ШСЗ), при спостереженні за грозами, градонебезпечними хмарами і т.д.

Сигнали, які випромінюються РЛС, та радіолокаційні сигнали, що несуть інформацію про об'єкти спостереження, поширюються в атмосфері, яка впливає на ефективність радіолокаційного спостереження. Система РЛС-атмосфера-ціль називається *радіолокаційним каналом*.

Метеорологічні РЛС, що призначені для виявлення і дослідження хмар і опадів, як правило, працюють в сантиметровому і міліметровому діапазонах хвиль. Виявлення і дослідження блискавок і гроз виробляється за допомогою РЛС дециметрового і метрового діапазонів. У системах радіозондування і ракетного зондування атмосфери звичайно використовуються РЛС метрового і дециметрового діапазонів. Істотний вплив на вибір діапазону хвиль має:

- характер цілей, що визначаються,
- необхідна точність вимірювання координат,
- гранично допустимі розміри антенної системи,
- умови розповсюдження електромагнітних хвиль в атмосфері.

Сучасні метеорологічні РЛС визначають напрямок на ціль за допомогою гостронаправлених антен і вимірюють дальність за часом розповсюдження радіохвиль до цілі та назад. Таким чином, положення цілі визначається в сферичній системі координат: азимуту α , кутом місця β і дальністю R .

Радіолокаційним оглядом простору називають послідовне здійснення радіолокаційного спостереження за об'єктами в просторі. Для радіолокаційного огляду заданої області простору необхідно здійснити послідовно спостереження за об'єктами по різним кутовим координатам та дальності.

Залежно від характеру руху діаграми спрямованості розрізняють наступні *методи огляду простору*: круговий, гвинтовий, пілкоподібний, спіральний, конічний, поступально-конічний і ін. (рис. 1.2)

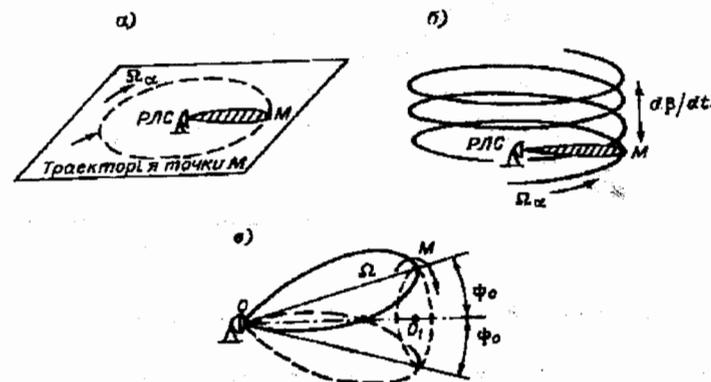


Рис. 1.2 – Методи огляду простору
а – круговий, б – гвинтовий, в – конічний

В процесі здійснення радіолокаційного огляду простору огляд по дальності здійснюється автоматично за рахунок кінцевої швидкості розповсюдження радіохвиль у просторі до максимальної дальності дії РЛС, при цьому послідовно зустрічаються на шляху поширення хвилі відбивні об'єкти.

1.3 Вимірювання координат об'єктів

Вимірювання кутових координат – пеленгація об'єктів – може бути заснована на аналізі амплітуд або фаз сигналів, що приймаються. Відповідно до цього розрізняють амплітудні і фазові методи вимірювання

кутових координат.

Амплітудні методи. У основу амплітудних методів вимірювання кутових координат об'єктів покладене використання направлених властивостей радіолокаційних антен, які характеризуються діаграмою направленості. При повороті антени амплітуда сигналу, що поступає від цілі, в точності буде повторювати діаграму направленості.

Визначення кутової координати методом максимуму полягає у тому, що діаграма направленості антени повертається до поєднання її максимуму з напрямком на об'єкт (рис. 1.3). В той момент, коли сигнал, що відбився від цілі, досягне максимального значення, відбувається визначення кутової координати об'єкту по положенню діаграми направленості в просторі.

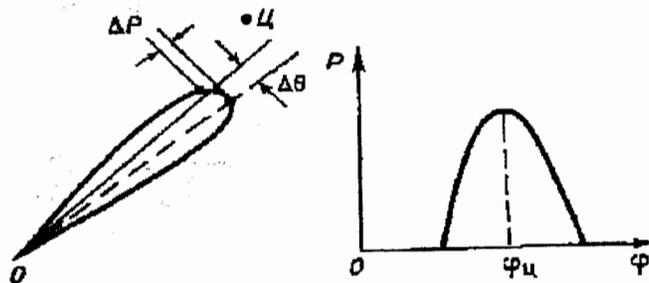


Рис. 1.3 – Вимірювання кутових координат об'єктів методом максимуму

Суть методу порівняння при визначенні кутових координат об'єктів полягає в порівнянні амплітуд сигналів, прийнятих послідовно в часі на одну антену, або одночасно на дві або чотири антени, зі зміщеними діаграмами направленості. Відповідно до цього розрізняють метод послідовного і метод паралельного порівняння.

Метод послідовного порівняння заснований на використанні однієї антени з діаграмою направленості у вигляді пелюстки, яка по черзі займає два положення (I і II) щодо лінії OO_1 (рис. 1.4). Якщо ціль знаходиться всередині кута $2\Delta\theta$, то, порівнюючи величини сигналів, послідовно прийнятих антеною, можна визначити відхилення цілі від напрямку OO_1 . Повертаючи антенну систему в просторі, можна знайти такий напрямок, коли величини сигналів, прийнятих при крайніх положеннях діаграми направленості, будуть однаковими. Напрямок антени у просторі, що відповідає рівності амплітуд сигналів, і буде визначати напрямок на ціль. Напрямок OO_1 , якому відповідає рівність сигналів цілі при двох положеннях антени, називається рівносигнальним (РСН).

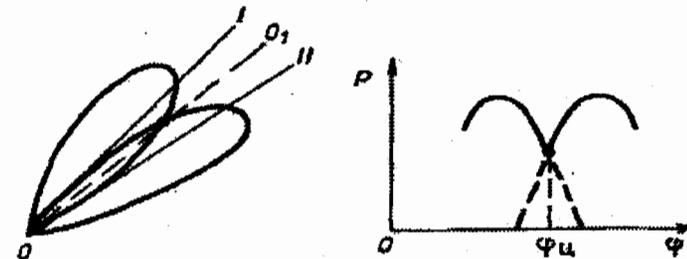


Рис. 1.4 – Вимірювання кутових координат об'єктів методом порівняння

Метод паралельного порівняння. Метод порівняння можна застосувати для сигналів, одночасно прийнятих на рознесених антенах. При використанні імпульсного способу радіолокації цей метод дозволяє визначати напрямок і вимірювати координати об'єкту навіть за час одного імпульсу. Тому РЛС, в яких використовується такий принцип вимірювання координат, називаються моноімпульсними. У разі потреби вимірювання двох кутових координат (у вертикальній і горизонтальній площині) число антен і приймальних каналів збільшується. Тому РЛС подібного типу є багатоканальними.

Фазовий метод. У радіолокації відстань, що проходить хвиля від відбиваючого об'єкта до приймальної антени, позначається як R . Тоді при прийнятті сигналів на 2 рознесені у просторі антени фази сигналів, що прийшли до них, будуть мати вигляд:

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} R_1, \quad \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} R_2,$$

де λ – довжина хвилі електромагнітних коливань, випромінюваних передавачем; R_1 та R_2 – відстані до відповідних антен.

З фазових методів вимірювання кутових координат найбільшого поширення набув метод порівняння фаз сигналів, одночасно прийнятих на рознесені антени. При визначенні кутових координат таким методом в площині необхідно мати дві рознесені антени, а при пеленгації в двох ортогональних площинах (наприклад, вертикальній і горизонтальній) необхідно мати відповідно чотири рознесені антени, попарно у відповідних площинах. Крім того, РЛС, в якій реалізований такий метод пеленгації, повинна мати п'яту антену – передавальну. Внаслідок різних відстаней від об'єкта пеленгації до приймальних антен відбиті сигнали в точках розташування цих антен будуть зсунуті по фазі на величину

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (R_1 - R_2)$$

Очевидно (рис. 1.5), що

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} L \sin \alpha,$$

де L – рознесення (база) приймальних антен, α – кут в площині пеленгації між напрямком приходу хвилі (напрямком візування) і нормаллю до бази.

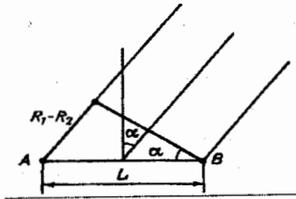


Рис. 1.5 – Визначення різниці фаз сигналів, що приймаються двома антенами

Для малих кутів $\sin \alpha \approx \alpha$, тому

$$\alpha = \frac{\lambda \Delta \varphi}{2\pi L}$$

Таким чином, вимірюючи фазовий кут φ , можна розрахувати кутову координату в площині.

Вимірювання відстані до об'єктів засноване на вимірюванні часу запізнювання радіолокаційних сигналів. Розрізняють амплітудний, частотний і фазовий методи вимірювання дальності.

Амплітудний (імпульсний) метод. При амплітудному методі вимірювання про відстань до об'єктів судять за часом запізнення характерної зміни амплітуди радіолокаційного сигналу, що приймається. Для цього випромінювані сигнали модулюють по амплітуді. Відповідно, такий амплітудний метод вимірювання дальності називають імпульсним методом, а радіолокатор, що реалізовує цей метод – імпульсною РЛС.

При імпульсному методі вимірювання дальності передавальний пристрій випромінює в простір потужні високочастотні імпульси (рис.1.6). Пройшовши відстань R , зондовий імпульс відбивається від цілі і сприймається приймачем РЛС. При постійній швидкості поширення електромагнітних хвиль в атмосфері час, необхідний для поширення хвилі на подвоєну дальність, буде дорівнювати

$$t_R = \frac{2R}{c},$$

$$R = \frac{c t_R}{2}.$$

звідки

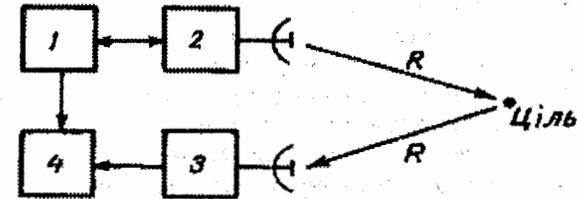


Рис. 1.6 – Амплітудний метод вимірювання дальності
1 – синхронізатор, 2 – передавач, 3 – приймач, 4 – вимірник часу

Таким чином, при імпульсному методі вимірювання дальності вимірювання зводиться до визначення проміжку часу між моментами випромінювання імпульсу і прийомом відбитого від цілі радіолокаційного сигналу.

Частотний метод. При частотному методі вимірювання дальності про дальність об'єктів судять по зміні частоти частотно-модульованих безперервних сигналів, випромінюваних радіолокаційним передавачем. При цьому час запізнювання електромагнітної хвилі при її поширенні визначається шляхом вимірювання різниці частот між випромінюваними високочастотними коливаннями і відбитими від цілі радіолокаційними сигналами.

Для вимірювання різниці частот використовуються фільтри або лічильники імпульсів. При використанні фільтрів можливі два варіанти: застосовується група фільтрів, налаштованих на фіксовані частоти, або один фільтр з змінною частотою настройки. Частотний метод вимірювання дальності дозволяє вимірювати дуже малі відстані з високою точністю і використовувати при цьому малі потужності випромінювання.

Фазовий метод. При фазовому методі вимірювання дальності про дальність судять по вимірюванню різниці фаз безперервних синусоїдальних коливань, які випромінюються передавальним пристроєм РЛС і приймаються приймачем.

Якщо фазова затримка, що виникає в електричних колах РЛС, наперед може бути відомою, зміряною і тому врахованою, то випадкове фазове

зрушення, яке виникає в процесі віддзеркалень від цілі, наперед враховане бути не може. Тому фазовий спосіб вимірювання дальності в сучасній локації практично не застосовується.

1.4 Види радіолокаційних станцій

Імпульсні РЛС. Схему імпульсної РЛС наведено на рис.1.7а. Синхронізатор призначений для формування пускових імпульсів, за допомогою яких здійснюється узгодження роботи в часі всіх блоків станції. Передавач 2 формує могутні короткі високочастотні імпульси. Він, як правило, складається з підмодулятора, модулятора і генератора високочастотних сигналів. Антенно-фідерний пристрій призначений для передачі потужних високочастотних імпульсів з виходу передавача до антени і їх випромінювання в простір, для формування необхідної діаграми направленості, а також для прийому відбитих високочастотних сигналів і підведення їх до входу приймача. В сучасних РЛС для випромінювання високочастотних сигналів і прийому відбитих використовується одна антена. Перемикач антени до виходу передавального пристрою в режимі випромінювання і до входу приймача в режимі прийому здійснює антенний перемикач.

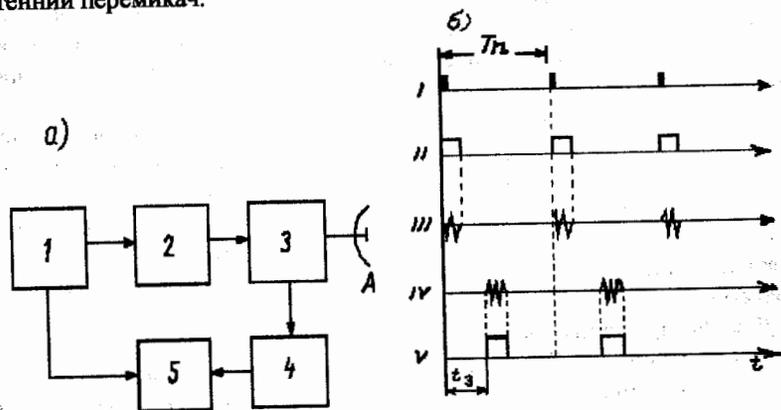


Рис. 1.7 – Структурна схема імпульсної РЛС (а) і часові діаграми її роботи (б)

1 – синхронізатор, 2 – передавач, 4 – приймач, А – антенно-фідерна система, 5 – індикаторний пристрій, 3 – антенний перемикач

Приймач призначений для посилення відбитих від об'єктів сигналів до необхідної величини, що забезпечує нормальну роботу індикатора і інших

пристроїв. Індикаторний пристрій служить для візуального спостереження відбитих сигналів і фіксації координат об'єкту. Антенний привід забезпечує послідовність огляду всього навколишнього простору, а вказівник напрямку дозволяє визначити положення антени в просторі і прочитати кутові координати об'єкту.

Для пояснення принципу дії імпульсної РЛС скористаємося часовими діаграмами, зображеними на рис. 1.7б. Пусковий імпульс з виходу синхронізатора (епюра I) одночасно поступає на підмодулятор передавача і на запуск генератора дидкоподібних імпульсів розгортки. У підмодуляторі відповідно до імпульсу, який запускає, формується імпульс заданої амплітуди і тривалості, форма якого близька до прямокутної.

Вихідний імпульс підмодулятора поступає в модулятор, де формується потужний імпульс високої напруги прямокутної форми, амплітуда якого досягає величини декількох тисяч і навіть десятків тисяч вольт (епюра II). Цей потужний імпульс постійного струму поступає в НВЧ-генератор, який генерує надвисокочастотні сигнали в ті моменти часу, коли до нього прикладений імпульс високої напруги від модулятора (епюра III). Імпульси високочастотних коливань передавача, пройшовши через антенний перемикач, по фідерній лінії поступають в антену і випромінюються в простір. Внаслідок недосконалості антенного перемикача незначна частина випромінюваної потужності поступає також на вхід приймального пристрою.

Високочастотні сигнали, що випромінюються антеною в простір, зустрівши на напрямку об'єкта, відбиваються від останніх і приймаються антеною, яка до цього часу антенним перемикачем підключена на вхід приймача. З антени відбиті сигнали (епюра IV) поступають на вхід приймача. У приймачі вони посилюються, детектуються і у вигляді імпульсів постійного струму (відеоімпульсів) (епюра V) поступають на індикатор для відтворення їх на екрані електронно-променевої трубки. Там вони спостерігаються у вигляді світлових зображень (відміток).

На екрані електронно-променевої трубки вимірюється і інтервал часу, необхідний для визначення дальності до об'єкту. Вказаний часовий інтервал вимірюється шляхом порівняння його з еталоном часу. Як такий еталон використовується напруга (заряду або розряду конденсатора), що лінійно змінюється. Вона є розгортаючою напругою електронно-променевої трубки індикатора. Внаслідок зміни розгортаючої напруги по лінійному закону електронний промінь рухатиметься по екрану трубки з постійною швидкістю, утворюючи на екрані лінію розгортки, що світиться.

Для вимірювання часу запізнювання відбитого сигналу відносно випромінюваного необхідно фіксувати моменти випромінювання і прийому. З цієї метою вихід приймача підключається до пластин вертикального відхилення, а вихід генератора розгортки – до пластин

горизонтального відхилення. Відеосигнали приймача викликають відхилення електронного променя від лінії розгортки, створюючи відмітки на екрані. Це дозволяє бачити на екрані трубки імпульс передавача, який просочується на вхід приймача через антенний перемикач, і відбиті імпульси, розташовані на лінії розгортки відповідно до часу їх запізнювання.

Допплерівські РЛС. Принцип дії доплерівської РЛС заснований на використуванні ефекту Доплера-Білопольського. Стосовно радіолокації він полягає у тому, що частота відбитих сигналів змінюється, якщо спостерігач і об'єкт, що відбиває, переміщуються один щодо одного.

Для вимірювання різниці частот відбитого і випроміненого сигналів необхідно зберегти інформацію про фазу випромінюваного сигналу до моменту прийому відбитого. Тому доплерівські РЛС називаються когерентними. Найпростіше інформація про фазу відбитого сигналу може бути збережена в РЛС з безперервним випромінюванням.

Нехай РЛС випромінює сигнал $U_{\text{вип}} = U_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1)$, де U_1 – амплітуда сигналу, ω_0 – кругова частота сигналу, φ_1 – початкова фаза сигналу, $\omega_0 t + \varphi_1$ – повна фаза сигналу.

Нехай на відстані R_0 від РЛС знаходиться нерухома ціль. Сигнал на вході приймача РЛС, відбитий цією цілью, опишеться співвідношенням $U_{\text{від}} = U_2 \sin[\omega_0(t+t_3) + \varphi_2]$, де U_2 – амплітуда сигналу, $t_3 = 2R_0/c$ – час запізнення відбитого сигналу, φ_2 – початкова фаза відбитого сигналу, $\omega_0(t+t_3) + \varphi_2 = \Phi$ – повна фаза сигналу.

Визначимо частоту відбитого сигналу. Для цього використовуємо відоме з фізики співвідношення між частотою і фазою коливання $\omega = d\Phi/dt$, де Φ – фаза коливання.

Відтоді частота відбитого сигналу

$$\omega_{\text{від}} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\left[\omega_0\left(t + \frac{2R_0}{c}\right) + \varphi_2\right]}{dt} = \omega_0$$

Таким чином, частота відбитого сигналу рівна частоті зондівного сигналу.

Нехай тепер ціль рухається. Отже, дальність до неї буде функцією часу $R = R(t)$. В цьому випадку відображений сигнал може бути представлений в наступному вигляді $U_{\text{від}} = U_2 \sin[\omega_0(t+2R(t)/c) + \varphi_2]$. Визначимо частоту відбитого сигналу:

$$\omega_{\text{від}} = \frac{d\left[\omega_0\left(t + \frac{2R(t)}{c}\right) + \varphi_2\right]}{dt} = \omega_0 + \frac{2\omega_0}{c} \frac{dR(t)}{dt} = \omega_0 \pm \frac{2\omega_0}{c} V_r$$

де: $dR(t)/dt = \pm V_r$ – радіальна швидкість цілі.

Отже, частота відбитого від рухомої цілі сигналу відрізнятиметься від частоти випромінюючого на величину

$$\omega_D = \pm \omega_0 \frac{2V_r}{c}$$

звану доплерівською частотою.

Оскільки радіальна швидкість зв'язана із швидкістю цілі співвідношенням $V_r = V \cos \xi$, то

$$\omega_D = \pm 2\omega_0 \frac{V \cos \xi}{c}$$

де: ξ – кут між лінією візування з РЛС на ціль і вектором її швидкості.

З останнього виразу виходить, що радіальну швидкість можна розглядати як проєкцію швидкості цілі на лінію візування (радіопромінь). Таким чином, V_r – швидкість переміщення цілі вздовж радіопроміню.

Когерентні РЛС з безперервним випромінюванням. РЛС безперервного випромінювання з використанням ефекту Доплера (рис. 1.8) працюють наступним чином.

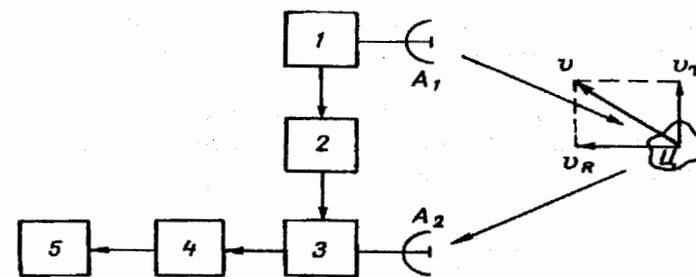


Рис. 1.8 – Структурна схема доплерівської РЛС з безперервним випромінюванням

1 – високочастотний генератор, 2 – атенюатор, 3 – приймач, 4 – вузькосмуговий фільтр, 5 – частотомір

Передавальна антена A_1 випромінює безперервні високочастотні синусоїдальні коливання з кутовою частотою $\omega_{\text{вип}}$ фаза яких в часі змінюється по лінійному закону. Ці коливання формуються генератором високої частоти.

Радіолокаційний сигнал, відбитий від цілі Π , що знаходиться на відстані R , приходить до приймальної антени A_2 з запізнюванням, яке викликає відставання фази сигналів, що приймаються, відносно

випромінюваних.

При виявленні нерухомого об'єкту сигнали, що приймаються, мають постійне зрушення фази щодо випромінюваних, а у разі рухомих об'єктів фаза сигналів безперервно мінатиметься унаслідок зміни дальності. Від зміни фази можна перейти до частоти, оскільки вони між собою однозначно зв'язані.

Таким чином, з-за наявності радіальної складової швидкості об'єкту частота радіолокаційних сигналів, що приймаються, відрізняється від частоти випромінюваних височастотних коливань.

Доплерівська частота є різницевою частотою биття між сигналами, що приймаються і випромінюються. Для виділення доплерівської частоти на вхід приймача 3 подаються відбиті коливання безпосередньо з антени, а також випромінювані коливання через атенюатор 2. На виході детектора приймача 3 виділяється частота биття за допомогою вузькосмугового фільтру 4, налаштованого на цю частоту. Виділена частота вимірюється частотоміром 5. Доплерівська РЛС повинна забезпечити спостереження об'єктів, що мають різні швидкості переміщення, тому фільтр доплерівських частот повинен мати певну смугу пропускання.

Оскільки доплерівська частота жорстко пов'язана з довжиною хвилі випромінюваних коливань, то для таких РЛС вибір довжини хвилі необхідно здійснювати з урахуванням можливих швидкостей об'єкту. Доплерівська РЛС в основному призначена для вимірювання швидкостей об'єктів.

Когерентно-імпульсні РЛС. У когерентно-імпульсній РЛС випромінюються когерентні імпульси, тобто височастотні імпульси з однаковою фазою переносної частоти (рис. 1.9).

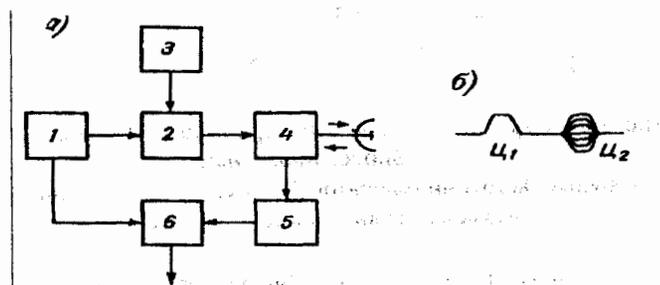


Рис. 1.9 – Принцип роботи когерентно-імпульсної РЛС
а – структурна схема, б – зображення відбитих імпульсів на екрані індикатора; 1 – когерентний гетеродина, 2 – підсилювач потужності, 3 – модулятор, 4 – антенний перемикач, 5 – підсилювач високої частоти, 6 – фазовий детектор

Вони формуються з височастотних коливань когерентного гетеродина, які використовуються як опорні в процесі вимірювань різниці частоти відбитого і випроміненого сигналів. Коливання когерентного гетеродина 1 посилюються підсилювачем потужності 2, який одночасно за допомогою модулятора 3 виконує функції ключового пристрою. При цьому з гармонійних коливань когерентного гетеродина „вирізається” передавальна послідовність радіоімпульсів. Крім того, ці коливання разом з відбитим сигналом після підсилювача високої частоти 5 подаються на фазовий детектор 6. В результаті має місце змішування безперервного сигналу опорного гетеродина з відбитим імпульсним сигналом.

На виході фазового детектора утворюється послідовність відеоімпульсів (імпульсів без височастотного заповнення), висота яких пропорційна різниці фаз опорного коливання і відбитих сигналів. Нехай напруга когерентного гетеродина описується виразом $u_{\text{гг}}(t) = U_{\text{гг}} \sin \omega_0 t$. Фаза цього коливання $\varphi_{\text{гг}} = \omega_0 t$. Нехай ціль рухається за законом $R(t) = R_0 + V_r \cdot t$.

Колівання радіоімпульсу, відбитого від ціль, що рухається, описується виразом

$$u_{\text{від}}(t) = U_{\text{від}} \sin \left[\omega_0 \left(t + t_r \right) + \varphi_{\text{в}} \right] = U_{\text{від}} \sin \left[\omega_0 \left(t + \frac{2R(t)}{c} \right) + \varphi_{\text{в}} \right]$$

де $\varphi_{\text{в}}$ – зсув фази сигналу при відбитті.

Підставивши в останній вираз значення $R(t)$, отримаємо

$$u_{\text{від}}(t) = U_{\text{від}} \cdot \sin \left(\omega_0 \left(t + \frac{2R_0}{c} + \frac{2v_r t}{c} \right) + \varphi_{\text{в}} \right)$$

$$u_{\text{від}}(t) = U_{\text{від}} \cdot \sin \left(\omega_0 t + \omega_0 \frac{2R_0 t}{c} + \omega_0 \frac{2v_r t}{c} + \varphi_{\text{в}} \right)$$

Введемо позначення:

$$\omega_0 t = \varphi_{\text{гг}};$$

$$\omega_0 \frac{2R_0 t}{c} = \varphi_0;$$

$$\omega_0 \frac{2v_r t}{c} = \omega_3$$

Тоді отримаємо:

$$u_{\text{від}}(t) = U_{\text{від}} \cdot \sin (\varphi_{\text{ггг}} + \varphi_0 + \omega_3 \cdot t + \varphi_{\text{в}})$$

Таким чином, фаза відбитого сигналу має вигляд:

$$\varphi_{\text{від}} = \varphi_{\text{ггг}} + \varphi_0 + \omega_3 \cdot t + \varphi_{\text{в}}$$

Тоді різниця фаз коливань $u_{\text{від}}$ та $u_{\text{кр}}$: $\varphi = \varphi_{\text{від}} - \varphi_{\text{кр}} = \omega_d t + \varphi_0 + \varphi_{\text{ц}}$ де

$$\varphi_0 = \omega_0 \frac{2R_0}{c}$$

Фаза цих коливань

$$\varphi_{\text{від}} = \omega_0 t + \omega_0 \frac{2R_0}{c} + \omega_0 \frac{2V}{c} t + \varphi_{\text{н}} = \omega_0 \left(t + \frac{2R_0}{c} \right) + \omega_d t + \varphi_{\text{н}}$$

Таким чином, різниця фаз з часом міняється, якщо ціль рухається ($\omega_d \neq 0$).

Амплітуда (висота) імпульсів на виході фазового детектора визначається співвідношенням

$$U_{\text{вих}} = \sqrt{U_{\text{кр}}^2 + U_{\text{від}}^2 + 2U_{\text{кр}}U_{\text{від}} \cos \varphi} =$$

$$= \sqrt{U_{\text{кр}}^2 + U_{\text{від}}^2 + 2U_{\text{кр}}U_{\text{від}} \cos(\omega_d t + \varphi_0 + \varphi_{\text{н}})}$$

з якого видно, що сигнал на виході фазового детектора є послідовністю відеоімпульсів, модульованих по амплітуді з частотою Доплера.

Якщо ціль нерухома, то протягом дії когерентних відбитих імпульсів не відбувається зміна амплітуд вихідних імпульсів (сигнал Ц₁, рис. 1.96).

Якщо ціль рухається, то різниця фаз когерентної напруги і сигналу безперервно змінюється, що приводить до змін амплітуди спостережних на екрані імпульсів (сигнал Ц₂, рис. 1.96). Відмітка рухомої цілі через пульсацію амплітуди виявляється двосторонньою і як би „заштрихованою”. Наявність руху цілі можна визначити, принаймні, по одній зміні полярності імпульсів, оскільки для цього достатньо, щоб дальність змінювалася всього лише на чверть довжини хвилі.

Псевдокогерентно-імпульсні РЛС. Основним недоліком когерентно-імпульсної РЛС є складність формування потужних високочастотних імпульсів з напруги когерентного гетеродина. Однокаскадний передавач, що працює в режимі самозбудження, яким, наприклад, є магнетрон, набагато простіше, ніж передавач когерентно-імпульсної РЛС. Проте імпульси, що генеруються магнетроном, некогерентні, тобто фаза переносної частоти змінюється випадковим чином від імпульсу до імпульсу. Для того, щоб некогерентні випромінєні імпульси при прийомі відбитих сигналів перетворити на когерентні, необхідно здійснити запам'ятовування початкової фази в кожному випромінюваному імпульсі за допомогою спеціального когерентного гетеродина. Когерентний гетеродин може працювати як в безперервному, так і в імпульсному режимі. У останньому випадку його коливання зриваються в кінці кожного періоду повторення. Псевдокогерентно-імпульсна РЛС працює наступним чином (рис. 1.10а). Імпульси магнетронного генератора 3 через атенуатор 6 потрапляють на когерентний гетеродин 7, який у цей момент часу

починає працювати на частоті власних коливань, але з нав'язаною магнетроном початковою фазою.

До кінця періоду повторення спеціальні імпульси зриву $U_{\text{ср}}$ зривають коливання когерентного гетеродина до початку генерації наступного імпульсу магнетрона. На рис. 1.10б показані відбиті імпульси $U_{\text{с}}$ для випадку, коли відстань до цілі від періоду до періоду не змінилася.

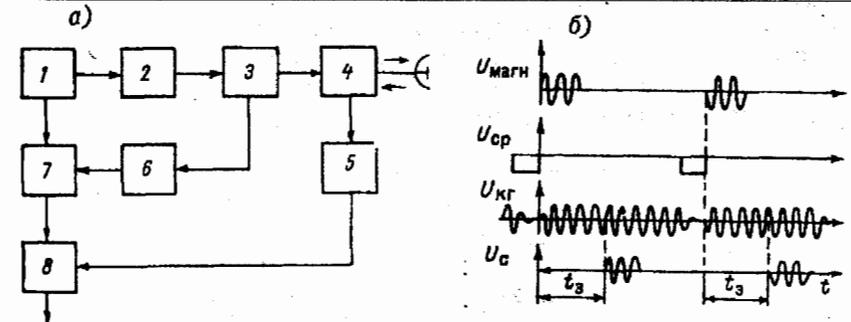


Рис. 1.10 – Принцип дії псевдокогерентно-імпульсної РЛС
а – структурна схема, б – часові діаграми в різних точках схеми; 1 – синхронізатор, 2 – модулятор, 3 – магнетронний генератор, 4 – антенний перемикач, 5 – підсилювач високої частоти, 6 – атенуатор, 7 – когерентний гетеродин, 8 – фазовий детектор

Незважаючи на випадковий характер початкової фази кожного імпульсу магнетрона, а, отже, і відбитого імпульсу, при незмінній відстані різниця фаз між коливаннями когерентного гетеродина і сигналу залишається постійною. Це визначає однакову амплітуду відеоімпульсів на виході фазового детектора 8, тобто початкові фази цих сигналів компенсуються. Така ж компенсація має місце при руханні цілі. Але в цьому випадку різниця фаз змінюється іще на величину, визначену часом запізнення від імпульсу до імпульсу. Таким чином, під дією когерентного гетеродина і корисного сигналу у фазовому детекторі відбуваються такі ж процеси, як і в когерентній РЛС з безперервним випромінюванням. Тому когерентні РЛС з безперервним випромінюванням і псевдокогерентні РЛС називають істинно когерентними РЛС.

Істинно когерентні РЛС, призначені для вимірювання швидкості цілей, в радіолокаційній метеорології широко застосовуються в дослідницьких цілях: когерентні РЛС з безперервним випромінюванням можуть застосовуватися для вимірювання швидкості переміщення

аеростатів, головних частин метеорологічних ракет. Псевдокогерентні РЛС можуть з успіхом застосовуватися для дослідження динамічних процесів в атмосферних утвореннях та хмарності.

РЛС з активною відповіддю. У РЛС з активною відповіддю інформація про об'єкт вилучається не з відбитого від нього сигналу, а з перевипроміненого. Сигнал випромінюється за допомогою приймально-передавального пристрою, що знаходиться на об'єкті. РЛС з активною відповіддю широко застосовуються в радіозондовних комплексах для визначення дальності радіозондів. Характерною особливістю систем радіолокації з активною відповіддю є наявність двох прийомопередавальних пристроїв; запитувача і відповідача (рис.1.11).

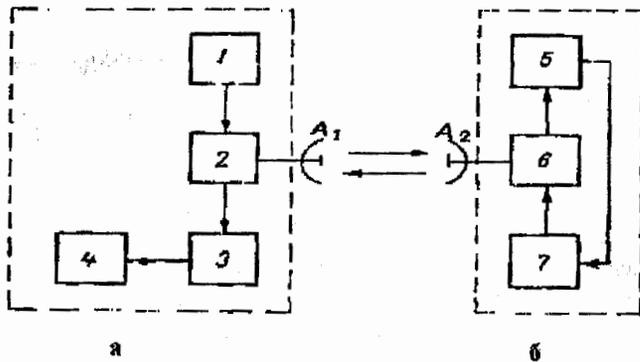


Рис 1.11 – Структурна схема радіолокаційної станції з активною відповіддю

а – запитувач (РЛС), б – відповідач; 1,7 – передавальні пристрої, 2,6 – антени перемикачі, 3,5 – приймачі і антенно-фідерні системи, 4 – кінцевий пристрій

У метеорологічних РЛС з активною відповіддю, що є складовими частинами систем радіозондування, запитувачем є імпульсна РЛС. Передавач запитувача виробляє потужні високочастотні імпульси, які антенною системою A_1 випромінюються в простір. Високочастотні сигнали запитувача приймаються антеною A_2 відповідача і через антенний перемикач 6 прямують на вхід приймача 5. Вихідні сигнали приймача управляють роботою передавача відповідача 7 таким чином, що на кожен сигнал запиту в простір посиляється сигнал відповіді. РЛС з активною відповіддю за принципом дії нагадує систему автоматичного двостороннього радіозв'язку.

Рівняння дальності активного радіолокаційного спостереження цілі з активною відповіддю. Радіолокаційну систему з активною відповіддю

представимо так, що вона складається з РЛС – запитувача і відповідача. При цьому як запитувач, так і відповідач мають по одній антені, що працює на випромінювання і прийом.

Щільність потоку потужності електромагнітної хвилі може бути визначеною за формулою:

$$\Pi = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi R^2},$$

де: P – потужність хвилі; S – площа поверхні, яку вона пронизує, $S = \pi R^2$, де R – відстань від випромінювача до точки, в якій розглядається даний сигнал.

Нехай РЛС – запитувач випромінює в простір імпульсні сигнали імпульсною потужністю $P_{\text{вип}}$. Щільність потоку потужності сигналу запитувача в точці розташування відповідача визначається співвідношенням

$$\Pi_s = \frac{P_{\text{вип}} D_s}{4\pi R^2},$$

де: R – відстань між запитувачем і відповідачем, D_s – коефіцієнт направленої дії антени запитувача у напрямку відповідача.

Потужність сигналу запитувача на вході приймача відповідача буде дорівнювати

$$P_s = \Pi_s A_0 = \frac{P_{\text{вип}} D_s A_0}{4\pi R^2},$$

де: A_0 – ефективна поверхня антени відповідача у напрямку запитувача.

Щільність потоку потужності сигналу відповіді в точці розташування запитувача дорівнює

$$\Pi_0 = \frac{P_{\text{вип}} D_0}{4\pi R^2},$$

де: $P_{\text{вип}}$ – потужність, випромінювана передавачем відповідача; D_0 – коефіцієнт спрямованої дії антени відповідача у напрямку запитувача.

Потужність сигналу відповіді на вході приймача запитувача буде дорівнювати

$$P_0 = \frac{P_{\text{вип}} D_0 A_s}{4\pi R^2}.$$

Напевно, що якщо відповідач знаходиться на граничній дальності $R_{\text{макс}}$, то в цьому випадку потужність на вході приймача запитувача повинна бути рівна його чутливості. З урахуванням цього вираз для P_s можна переписати у вигляді

$$P_{\text{мін}} = \frac{P_{\text{вип}} D_s A_0}{4\pi R_{\text{макс}}^2},$$

Звідки

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\text{вип}} D_z A_o}{4\pi P_{\text{мин.з}}}}$$

Якщо тепер відповідач знаходитиметься на граничній дальності R_{\max} , то в цьому випадку потужність на вході приймача запитувача повинна бути рівна його чутливості $P_{\text{мин.о}}$. З урахуванням цього вираз $R_{\text{мин.о}}$ можна переписати у вигляді

$$P_{\text{мин.о}} = \frac{P_{\text{вип}} D_o A_z}{4\pi R_{\max}^2}$$

Звідки

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\text{вип}} D_o A_z}{4\pi P_{\text{мин.о}}}}$$

Остання формула зветься рівнянням дальності для цілі з активною відповіддю. Система буде енергетично збалансована, коли дальності R_{\max} будуть рівні. Прирівнявши праві частини виразів для цієї рівності, отримаємо

$$\frac{P_{\text{вп}} D_z A_o}{P_{\text{мин.о}}} = \frac{P_{\text{вп}} D_o A_z}{P_{\text{мин.з}}}$$

звідки маємо

$$P_{\text{вп}} P_{\text{мин.з}} D_z A_o = P_{\text{вп}} P_{\text{мин.о}} D_o A_z$$

Останній вираз дозволяє призвести вибір основних параметрів системи. Отримане співвідношення не враховує умов поширення електромагнітних хвиль, тому воно справедливе лише для вільного простору.

1.5 Характеристики і параметри радіолокаційних станцій

Технічні характеристики. Довжина хвилі (переносна частота) високочастотних коливань $\lambda(f)$. При виборі довжини хвилі враховують: характер відбиття електромагнітних хвиль від різних об'єктів, можливості конструювання антен прийнятних габаритів, умови поширення електромагнітних хвиль, можливість генерації високочастотних коливань великої потужності і прийому слабких відбитих сигналів. Зокрема, якщо геометричні розміри об'єкту набагато менше довжини хвилі, то практично відбиття відсутнє. Відбиття буде значним тільки при умові, коли довжина хвилі менше розмірів об'єкту або одного порядку з ним. Зі зменшенням довжини хвилі можна створити порівняно невеликі антени, що мають високі направлені властивості, тобто, що мають вузькі діаграми направленості (великий коефіцієнт направленої дії). В результаті звуження діаграми направленості зростає точність вимірювання кутових координат і

розрізняльна здатність по кутових координатах. Також при інших рівних параметрах збільшується відстань радіолокаційного спостереження. На рупносподження НВЧ-сигналів істотно впливає атмосфера, яка в загальному випадку поглинає і розсіює високочастотну енергію. Саме тому вибір довжини хвилі РЛС робиться компромісно, виходячи з оцінки вказаних факторів.

Імпульсна випромінювана потужність. При використанні імпульсних методів радіолокації розрізняють середню потужність передавача за час тривалості імпульсу P_i і середню потужність передавача за період повторення імпульсів $P_{\text{ср}}$. Для забезпечення більшої дальності дії РЛС потужність випромінювання повинна бути значною.

Тривалість випромінюваних високочастотних імпульсів τ . Істотно впливає на основні характеристики РЛС: радіус „мертвої зони”, розрізняльну здатність, і дальність дії РЛС. З погляду отримання великих значень ефективних площин розсіювання цілі (ЕПР) і забезпечення більшої дальності дії РЛС доцільно мати великі значення тривалості імпульсів. При цьому можливо звуження смуги пропускання радіолокаційного приймача, що призводить до підвищення його чутливості. Підвищення тривалості імпульсів обмежене наступними факторами: максимально допустимою середньою потужністю високочастотного генератора передавача, величиною „мертвої зони” і розрізняльною здатністю по відстані.

Частота повторення випромінюваних імпульсів. Вибір частоти повторення імпульсів відбувається відповідно із максимальною дальністю РЛС (однозначність вимірювання), із швидкістю огляду простору і необхідним відношенням сигнал/шум (накопичення імпульсів). Мінімальне значення частоти повторення імпульсів вибирається так, щоб тривалість періоду випромінювання імпульсів була б не менше часу змінювання сигналу, відбитого від самої віддаленої цілі.

Діаграма направленості антени. Для визначення напрямку приходу відбитого імпульсу, тобто для визначення кутових координат цілі – азимута та кута місця, випромінювана енергія концентрується в якомусь одному напрямі і здійснюється направлений прийом (прийом сигналів тільки у напрямі випромінюваної потужності). Направлені передача і прийом, окрім вимірювання кутових координат забезпечують істотне збільшення дальності радіолокації. У метеорологічних РЛС одна і та ж антена використовується як для випромінювання зондового сигналу, так і для прийому відбитого сигналу.

Діаграмою направленості антени на передачу зветься залежність випромінюваної потужності (або напруженості поля) від напрямку (рис.1.12а). Діаграмою направленості антени на прийом називається залежність потужності (напруженості поля) на виході антени від напрямку приходу електромагнітної хвилі (рис. 1.12а).

У діаграмі направленості є основна (головна) пелюстка, що характеризує основне випромінювання антени і бічні пелюстки, рівень яких істотно нижче за головну пелюстку. У реальних антенах достатньо легко можна отримати бічні пелюстки, рівень яких на 20–30 дБ нижче основного. Бічні пелюстки характеризують паразитне випромінювання РЛС і прийом відбитих сигналів, створених паразитним випромінюванням.

Ширина діаграми направленості визначається кутом розходження θ на рівні половини максимального значення потужності ($0,5P_{\max}$), що випромінюється антеною (рис.1.12в). Ширина діаграми направленості пропорційна відношенню довжини хвилі випромінюваних коливань до діаметру (розміру) антени.

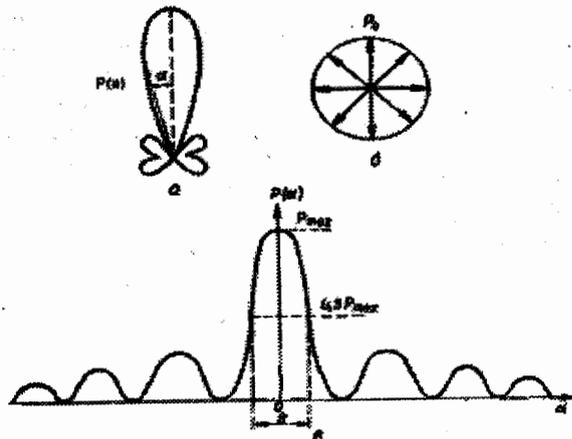


Рис. 1.12 – Види діаграми направленості
а – направлене випромінювання; б – рівномірне (ізотропне) випромінювання; в – діаграма направленості в декартовій системі координат

Коефіцієнт направленої дії антени в заданому напрямку показує, в скільки разів потужність, випромінювана в заданому напрямі, більше потужності при рівномірному випромінюванні:

$$G(\alpha) = P(\alpha) / P_0,$$

де: $P(\alpha)$ – величина потужності, що випромінює під кутом α до осі діаграми направленості (мал. 1.12а); P_0 – величина потужності, що випромінює при рівномірному (ізотропному) випромінюванні (мал. 1.12б).

Коефіцієнт направленої дії антени у напрямі максимуму діаграми направленості визначається співвідношеннями $G(0) = 4\pi / (\theta_r \theta_a)$, $G(0) = 4\pi A / \lambda^2$, де θ_r, θ_a – ширина діаграми направленості антени в горизонтальній і

вертикальній площині відповідно (у радіанах), A – ефективна площа антени (площа, що реально бере участь в прийомі електромагнітної енергії), або апертура, яка визначається через геометричну площу A_r співвідношенням $A = (0,3-0,7) A_r$.

Звичайно в метеорологічних РЛС діаграма направленості має голчастий вигляд, при цьому ширина діаграми направленості в горизонтальній і вертикальній площині дорівнюють одне одному і визначаються співвідношенням

$$\theta_r = \theta_a = (60-80) \lambda / d_a,$$

де: d_a – діаметр розкриття антени.

Чутливість радіолокаційного приймача оцінюється потужністю мінімально помітного сигналу на фоні власних шумів приймача. Чутливість радіолокаційного приймача може бути задана трьома способами: одиницями потужності, відносними одиницями потужності і одиницями коефіцієнта шуму.

Очевидно, що чутливість приймача тим краще, чим менше рівень його власних шумів, який в основному визначається шумовими властивостями перших каскадів. Для підвищення чутливості приймачів (зниження рівня власних шумів) в них використовуються малошумні підсилювачі високої частоти у вигляді ламп бігучої хвилі (ЛБХ), параметричних підсилювачів (ПП), електронно-променевих параметричних підсилювачів (ЕППП) і інших типів підсилювачів. Чутливість сучасних радіолокаційних приймачів без підсилювачів високої частоти складає приблизно 10^{-12} Вт, з підсилювачами у вигляді ЛБХ, ПП і ЕППП – 10^{-13} Вт, з квантовими підсилювачами – 10^{-14} Вт.

Тактичні характеристики. Зона спостереження. Зонаю спостереження РЛС називається область простору, в якій може здійснюватися виявлення об'єктів і вимірювання їх координат з заданою точністю. Зона спостереження характеризується максимальною і мінімальною дальностями дії станції, межами огляду по азимуту і куту місця. Мінімальною дальністю дії РЛС (мертвою зоною) називається довколишня область простору, в якій РЛС не може знаходити об'єкти. Очевидно, що радіус мертвої зони залежить від тривалості випромінюваних імпульсів, оскільки до тих пір, поки імпульс не „відірветься” від антени, прийом відбитих сигналів неможливий. Максимальною дальністю дії РЛС називається максимально можлива відстань, на якій ще можливе виявлення об'єктів. Воно однозначно визначається частотою повторення випромінюваних імпульсів. Межа огляду по азимуту та куту місця в РЛС вибирається такою, щоб забезпечити огляд всієї небесної півсфери.

Розрізняльна здатність характеризує можливість роздільного радіолокаційного спостереження цілей, близько розташованих одна

відносно одної. Розрізняють розрізняльну здатність по дальності і по кутовим координатам, а також по швидкості (для доплерівських РЛС).

Для того, щоб сигнали від двох розташованих поряд цілей сприймалися роздільно, необхідно, щоб сигнали, відбиті від них, не накладалися один на одного.

Просторову розрізняльну здатність метеорологічної РЛС характеризують об'ємом, розміри якого по дальності і кутовим координатам такі, що сигнали від цілей, які знаходяться в двох сусідніх об'ємах, не накладатимуться один на одного. Цей об'єм називається розрізняльним або імпульсним.

Розрізняльна здатність по дальності. Нехай у напрямку поширення зондового імпульсу розташовані дві точкові цілі А (ближня до РЛС) і В – дальня (рис. 1.13). Знайдемо ту мінімальну відстань між ними, при якому ці цілі будуть роздільно помітні.

Нехай в деякий момент часу передній фронт зондового імпульсу досяг цілі А. Ціль А буде опромінюватися і, отже, відбивати електромагнітну енергію протягом часу τ_n . Через час $\Delta R/c$ після початку відбиття від цілі А почне давати відбиття ціль В. Цілі А і В можна розрізнити тільки в тому випадку, якщо відбиття від цілі А закінчиться до моменту часу, коли до неї підійде відбиття від цілі В.

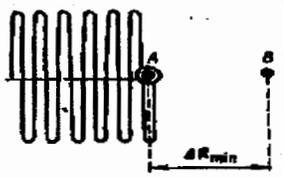


Рис. 1.13 – Розрізняльна здатність РЛС по дальності

Запізнювання сигналу, відбитого від цілі В, по відношенню до сигналу, відбитого від цілі А:

$$\Delta t = 2 \Delta R_{\min} / c.$$

Для роздільного прийому обох сигналів повинна виконуватися умова

$$\Delta t = 2 \Delta R_{\min} / c \geq \tau_n.$$

Звідси

$$\Delta R_{\min} = c \cdot \tau_n / 2.$$

Розрізняльна здатність по кутовим координатах. Визначимо мінімальну кутову відстань між цілями А і В по азимуту, при якому сигнали, відбиті від них, прийматимуться роздільно. Нехай діаграма

направленості РЛС обертається по ходу годинникової стрілки і в деякий момент часу правий край діаграми досягнув цілі А (рис. 1.14).

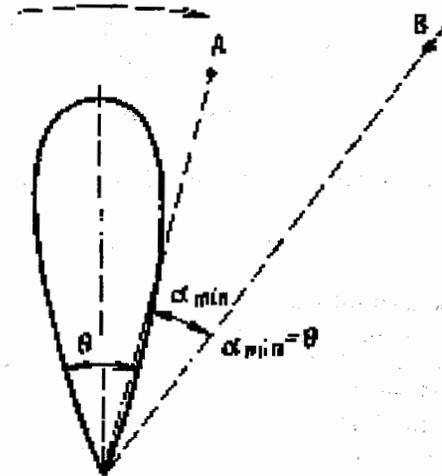


Рис. 1.14 – Розрізняльна здатність РЛС по кутовим координатах

Ціль А буде опромінюватися і давати відбитий сигнал протягом повороту антени на кут θ , рівний ширині діаграми направленості. Цілі А і В можна буде розрізнити по кутовим координатам тільки в тому випадку, якщо відбиття від цілі А закінчиться до моменту, коли почне створювати відбитий сигнал ціль В. Тому $\alpha_{\min} = \theta$. Очевидно, що для кутів місця буде отримано таке ж співвідношення.

Імпульсний об'єм для діаграм направленості типу „голчастий промінь”, нехтуючи їх конусністю, можна знайти, як об'єм циліндра $V_{\text{імп}} = S \cdot H$ з утворюючою (висотою циліндра – H) $c \cdot \tau_n / 2$ і площею основи (S) $\pi D^2 / 4$. З трикутника на мал. 1.15 можна записати:

$$D/2 = R \cdot \text{tg} \theta / 2.$$

Для малих θ : $\text{tg} \theta \approx \theta$ і тоді $D/2 \approx R \cdot \theta / 2$ і тоді отримуємо $D = R \theta$. Тут R – похила дальність від РЛС до імпульсного об'єму (рис. 1.15).

З урахуванням цього імпульсний об'єм

$$V = \pi \cdot (R^2 \theta^2 / 4) \cdot (c \tau_n / 2) = \pi \cdot c \cdot \tau_n \cdot R^2 \cdot \theta^2 / 8.$$

Всі точкові цілі, що знаходяться усередині імпульсного об'єму, одночасно братимуть участь в створенні відбитого сигналу.

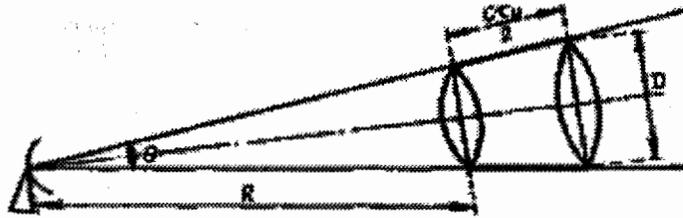


Рис. 1.15 – Імпульсний (розрізняльний) об'єм метеорологічної РЛС

Контрольні запитання

- 1 Що таке електромагнітна хвиля?
- 2 Властивості електромагнітних хвиль
- 3 Охарактеризуйте способи радіолокаційного спостереження
- 4 Методи огляду простору
- 5 Вимірювання куткових координат
- 6 Особливості амплітудних та фазових методів вимірювання куткових координат
- 7 Вимірювання дальності об'єктів
- 8 Структурна схема та особливості роботи імпульсної РЛС
- 9 Поясніть принцип дії доплерівської РЛС
- 10 Структурна схема когерентної доплерівської РЛС з безперервним випромінюванням
- 11 Особливості роботи когерентно-імпульсної доплерівської РЛС
- 12 Охарактеризуйте псевдокогерентно-імпульсний РЛС
- 13 Характерні особливості роботи РЛС з активною відповіддю
- 14 Рівняння дальності цілі для РЛС з активною відповіддю
- 15 Характеристики антен РЛС та їхній вплив на параметри прийнятого радіолокаційного сигналу
- 16 Технічні характеристики РЛС
- 17 Тактичні характеристики РЛС

2 Основи радіометеорології

2.1 Основні електрофізичні характеристики атмосфери і їх зв'язок з метеорологічними параметрами атмосфери

Відбитий радіолокаційний сигнал є носієм інформації про метеорологічні цілі. Утворення відбитого сигналу відбувається в

результаті взаємодії електромагнітних хвиль, випромінюваних РЛС, з атмосферними утвореннями, які є метеоцілями. З теорії електромагнітного поля відомо, що на процес взаємодії електромагнітних хвиль з середовищем істотний вплив роблять її електрофізичні характеристики:

- відносна діелектрична проникність – ϵ' ,
- магнітна проникність – μ ,
- питома провідність – g .

Реальна атмосфера і її різні утворення (хмари, опади, тумани і т.п.) з погляду електрофізичних властивостей є напівпровідним середовищем. У діапазоні хвиль, що використовуються в метеорологічних РЛС (МРЛС), процес їх взаємодії з атмосферою визначається значенням відносної діелектричної проникності ϵ' . Значення ϵ' істотним чином залежать від таких метеопараметрів, як температура, тиск, питома вологість, водність хмар і інтенсивність опадів.

Визначимо зв'язок діелектричної проникності з метеопараметрами атмосфери. При визначенні цього зв'язку реальну атмосферу будемо представляти як суміш „сухих” газів і водяної пари, в якій знаходяться утворення водного аерозолу (хмари, опади, тумани).

З курсу фізики відомо, що для будь-якого поляризованого середовища значення відносної діелектричної проникності визначається співвідношенням

$$\epsilon' = 1 + \chi$$

де: χ – діелектрична сприйнятливості речовини.

Значення коефіцієнта χ визначається виразом

$$\chi = \beta N,$$

де: β – поляризаційність молекул, яка характеризує ступінь податливості молекули дії електромагнітного поля; N – число молекул в одиниці об'єму.

Діелектрична сприйнятливості атмосфери як середовища, що складається з „сухих” газів, водяної пари і водної аерозольної фракції (утворень гідрометеорних часток), може бути представлена таким чином:

$$\chi = \chi_r + \chi_{вп} + \chi_{ва},$$

де: χ_r – діелектрична сприйнятливості газів; $\chi_{вп}$ – діелектрична сприйнятливості водяної пари; $\chi_{ва}$ – діелектрична сприйнятливості водного аерозолу.

У свою чергу,

$$\begin{aligned} \chi_r &= \beta_r N_r; \\ \chi_{вп} &= (\beta_{вп} + \beta_{вп} / T) N_{вп}; \\ \chi_{ва} &= 4\pi \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| N_{ва} \end{aligned}$$

де: β_r – поляризаційність (поляризаційна сприйнятливості) однієї молекули газу; $\beta_{вп}$ – поляризаційна сприйнятливості однієї молекули

водяної пари при температурі 1 К; $N_{\Gamma} = p/(kT)$ – число молекул газу в 1 м^3 (p – тиск в Паскалях, T – абсолютна температура, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана); $N_{ВП} = e/(kT)$ – кількість молекул водяної пари в 1 м^3 (e – пружність водяної пари в Паскалях); $N_{ВА}$ – число частинок водного аерозолу в 1 м^3 ; r – середній радіус частинки аерозолу; m – комплексний коефіцієнт заломлення електромагнітних хвиль речовиною часток, який визначається виразом

$$m = \sqrt{\varepsilon'_k} = \sqrt{\varepsilon' - j \frac{g}{\omega \varepsilon_0}} = n - jl$$

де: $\varepsilon'_k = \varepsilon' - j(g/(\omega \varepsilon_0))$ – комплексна діелектрична проникність речовини частинки; $\varepsilon_0 = (1/(26\pi)) \cdot 10^{-9}$ – діелектрична проникність вакууму, Ф/м; ω – частота електромагнітних хвиль; g – питома провідність безмарної атмосфери.

Дійсна частина n комплексного коефіцієнта заломлення називається показником заломлення, а уявна частина l – показником поглинання.

З урахуванням цих виразів висхідну формулу можна уявити наступним чином:

$$\varepsilon' = 1 + \frac{\beta_{\Gamma} p}{kT} + \frac{e}{kT} \left(\beta_{ВП} + \frac{\beta_{ВП}}{T} \right) + 4\pi r^3 \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right] N_{ВА}$$

Значення β_{Γ} і $\beta_{ВП}$ визначаються експериментально. Підставляючи їх значення у останню формулу і виражаючи тиск p і пружність водяної пари e в гектопаскалях, температуру T за шкалою Кельвіна, отримуємо

$$\varepsilon' = 1 + \left[\frac{157}{T} \left(p + \frac{4800 e}{T} \right) \right] 10^{-6} + 4\pi r^3 \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right] N_{ВА}$$

Для потреб практики зручно виразити пружність водяної пари e через питому вологість повітря q , а кількість частинок водного аерозолу $N_{ВА}$ через його водність w .

Для цього використаємо відомі співвідношення $q = 622 e / p$ та $w = (4\pi/3) r^3 \rho N_{ВА}$, де ρ – густина речовини аерозолу.

Підставляючи їх в останній вираз одержимо:

$$\varepsilon' = 1 + \left[\frac{157 p}{T} \left(1 + 7,717 \frac{q}{T} \right) \right] 10^{-6} + 3 \frac{w}{\rho} \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right]$$

Цей вираз зручний тим, що вхідні в нього значення p , q , T публікуються в метеорологічних і аерологічних щорічниках і довідниках, а значення w вимірюються. Відносна діелектрична проникність вакууму дорівнює одиниці, тоді з урахуванням цього перший доданок останньої формули можна розглядати як внесок вологого повітря в ε' , а другий доданок – як внесок аерозольних утворень.

З цього виразу витікає, що збільшення тиску, питомої вологості повітря і водності аерозольних утворень приводить до збільшення діелектричної проникності. Збільшення температури зменшує ε' . Фізично це явище пояснюється тим, що підвищення температури призводить до розширення повітря і зменшення його густини, а збільшення p і q , навпаки, до збільшення густини повітря. Збільшення вологості аерозольного утворення призводить до збільшення числа молекул води в одиниці об'єму, а, значить, до збільшення діелектричної сприйнятливості аерозолу.

Як впливає з цього виразу, значення ε' трохи перевищує одиницю. Питома провідність g безмарної атмосфери для діапазону хвиль, мживаного в метеорологічній радіолокації, нехтуючи мала. Тому можна мнжати, що її коефіцієнт заломлення – дійсна величина і дорівнює n .

(Тже, має місце співвідношення $m = \sqrt{\varepsilon'} = n$. Оскільки ε' трохи більше

$$\sqrt{1 + \alpha} \approx 1 + \frac{1}{2} \alpha$$

одиниці, то можна використати відоме наближення,

1. Отримаємо:

$$n = \sqrt{\varepsilon'} = 1 + \left[\frac{78,5 p}{T} \left(1 + 7,717 \frac{q}{T} \right) \right] 10^{-6} + \frac{3 w}{2 \rho} \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right]$$

Значення коефіцієнта заломлення n ненабагато перевищують одиницю. Тому для зручності значення n вимірюють в N-одиницях

$$N = (n - 1) 10^6$$

Метеопараметрам, що визначають значення n , властива мінливість по сезонах, годинам діб і висоті. Дня значень n теж характерна така мінливість. Ця залежність n від висоти, сезону і часу доби представлена на рис. 2.1, 2.2.

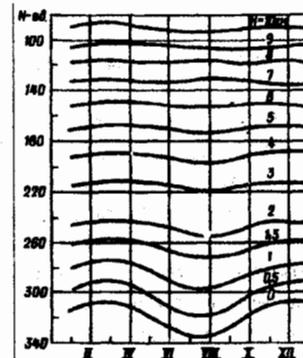


Рис. 2.1 – Річний хід зміни коефіцієнта заломлення n на різних висотах

На рис. 2.1 показаний приклад зміни річного ходу коефіцієнта заломлення n в N -одиницях на різних висотах. Видно, що найвиразніше сезонні зміни n виражені в нижній тропосфері до висот 1,5 – 2,0 км. Максимальні значення коефіцієнта заломлення спостерігаються влітку, а мінімальні – взимку. Такий хід коефіцієнта заломлення обумовлений річним ходом вологості повітря з максимумом в тепле півріччя. На висоті 6 – 7 км середньомісячне значення n постійне протягом всього року

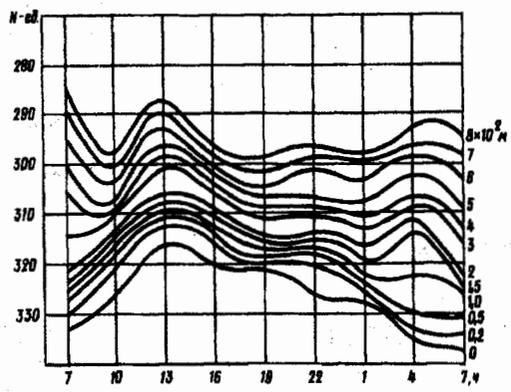


Рис. 2.2 – Добовий хід коефіцієнта заломлення n в нижніх шарах атмосфери влітку

На рис. 2.2 показана добова зміна n в нижньому шарі атмосфери влітку (до 800 м). Такий хід n протягом доби визначається добовим ходом температури і вологості повітря.

2.2 Взаємодія електромагнітних хвиль з атмосферою

З теорії електромагнітного поля відомо, що при поширенні електромагнітних хвиль в будь-якому середовищі, відмінному від вільного простору (вакууму), відбувається їх послаблення та зміна швидкості. Величина послаблення електромагнітних хвиль і швидкості їх поширення визначаються електрофізичними властивостями середовища

При поширенні електромагнітних хвиль в атмосфері їх послаблення відбувається за рахунок поглинання енергії газами атмосфери, поглинання і розсіяння її гідрометеорними частинками. Послаблення радіохвиль в радіолокації – явище негативне, оскільки знижує дальність дії радіолокаційних станцій. Разом з тим в метеорологічній радіолокації розсіяння електромагнітної енергії гідрометеорними частинками утворює

відбитий сигнал. Дійсно, частина енергії сигналу, випромінюваного РЛС, досягає метеоцілі і розсіюється (перевипромінюється) її частинками по всіх напрямках. Енергія, яка розсіюється цілком у зворотному напрямі, утворює відбитий сигнал.

Ослаблення енергії електромагнітних хвиль гідрометеорними частинками, знижуючи дальність дії метеорологічних РЛС, разом з тим дозволяє одержати інформацію про такі важливі характеристики метеоцілей, як водність хмар і інтенсивність опадів.

Зміна швидкості поширення електромагнітних хвиль в атмосфері може також істотно вплинути на отримання радіолокаційної метеорологічної інформації. Ця зміна швидкості при одних метеоумовах може збільшувати дальність дії РЛС, а в інших зменшувати.

Ослаблення в газах атмосфери при поширенні електромагнітних хвиль має місце внаслідок поглинання і розсіювання енергії хвиль молекулами. В діапазоні хвиль, що використовується в метеорологічній радіолокації, можна розглядати тільки ефект поглинання.

З газів, які складають атмосферу, найсильніше поглинають електромагнітну енергію кисень і водяна пара. Причина цього полягає у властивостях речовин. Молекули цих газів мають яскраво виражений дипольний характер. Вплив електромагнітного поля, завдяки цьому, викликає їх вимушені коливання. Енергія електромагнітного поля витрачається на здійснення цих коливань. Молекули кисню взаємодіють з магнітною складовою електромагнітного поля, молекули водяної пари – з електричною.

Втрати електромагнітної енергії в газах атмосфери враховуються за допомогою питомих коефіцієнтів поглинання киснем (γ_K) водяною парою (γ_{H_2O}). Ці коефіцієнти характеризують поглинання електромагнітної енергії на одиниці відстані і виражаються в дБ/км. Сумарний питомий коефіцієнт поглинання в газах визначається співвідношенням

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_K + \gamma_{H_2O}$$

Послаблюючі властивості кисню залежать від тиску і температури. З пониженням температури поглинання киснем росте. Так, при температурі 40°C воно на 78% більше, ніж при 20°C. Ослаблення водяною парою пропорційне питомій вологості повітря і також росте з пониженням температури (при температурі – 40°C поглинання на 20–45% більше, ніж при 20°C).

Поглинання електромагнітної енергії киснем і водяною парою в сильному ступені залежить від довжини електромагнітних хвиль (рис. 2.3). Ці залежності отримані при температурі 20°C у поверхні Землі. Їх аналіз показує, що, як у кисню, так і у водяної пари є області довжин хвиль (частот), де поглинання велике за рахунок резонансних явищ. У кисню ці області лежать поблизу довжин хвиль 0,25 і 0,5 см, де γ_K відповідно рівні 3

і 14 дБ/км. Резонансне поглинання у водяної пари спостерігається на хвилях 0,16 і 1,35 см. На цих довжинах хвиль при удільній вологості $q = 7,5 \text{ г/м}^3$ коефіцієнт поглинання рівний 20 і 0,2 дБ/км відповідно.

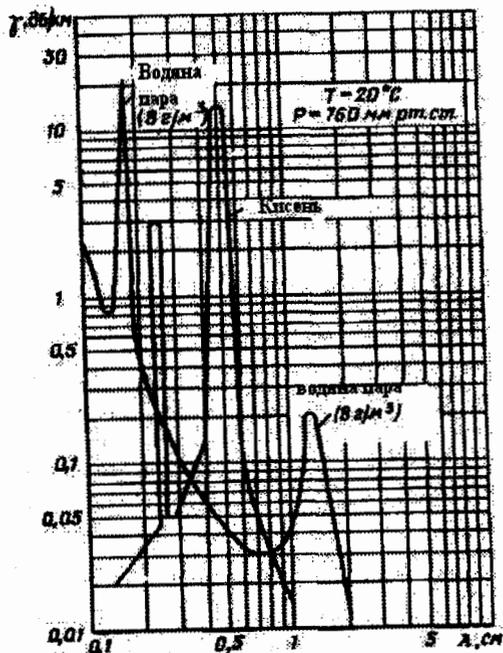


Рис.2.3 – Залежність питомих коефіцієнтів поглинання кисню і водяної пари від довжини електромагнітної хвилі

Ослаблення електромагнітної енергії гідрометеорними частинкам при розповсюдженні електромагнітних хвиль відбувається з наступних причин. Електромагнітні хвилі порушують в гідрометеорних частинках змінні струми з частотою хвиль. Частинка завдяки цьому стає джерелом випромінювання і випромінює електромагнітні хвилі по всіх напрямках. Таким чином, енергія хвилі, що приходить, витрачається на створення вторинного випромінювання. Відбувається розсіяння електромагнітної енергії падаючої хвилі. Разом з цим частина енергії струмів, збуджених в частинці хвилею, що приходить, витрачається на створення в ній тепла. Відбувається необоротний перехід електромагнітної енергії падаючої хвилі в теплову енергію, тобто відбувається поглинання електромагнітної енергії.

Як міру поглинання і розсіяння електромагнітної енергії частинкою приймають ефективну площу поглинання частинки (σ_{pi}) і ефективну площу повного розсіювання (σ_{pi}).

Під ефективною площею поглинання частинки розуміють площу, яка, будучи помноженою на щільність потоку потужності падаючої хвилі, дає потужність, поглинену частинкою:

$$\sigma_{pi} = P_p / S,$$

де: P_p – потужність, що поглинена частинкою; S – щільність потоку потужності падаючої хвилі.

Щільність потоку рівномірно випромінюваної потужності в деякій точці, віддаленій від випромінювача на відстань R , визначає потужність, що доводиться на одиницю поверхні сфери радіусу R . Таким чином,

$$S = P_{вип} / (4\pi R^2),$$

де $P_{вип}$ – випромінювана потужність.

Під ефективною площею повного розсіювання частинки розуміють площу, яка будучи помножена на щільність потоку потужності падаючої хвилі, дає потужність, розсіяну частинкою:

$$\sigma_{pi} = P_p / S,$$

де P_p – потужність, що розсіяна частинкою.

Для визначення втрат потужності електромагнітної хвилі внаслідок ослаблення електромагнітної енергії гідрометеорними частинками використовують питомі коефіцієнти поглинання і повного розсіяння в дБ/км.

Вони визначають втрати потужності електромагнітної хвилі за шляшок поглинання і розсіяння гідрометеорними частинками на шляху в 1 км. Ці коефіцієнти пов'язані із значеннями σ_{pi} , σ_{pi} і концентрацією частинок наступними співвідношеннями:

$$\gamma_{pi} = 4,34 \cdot 10^3 N \sigma_{pi}; \quad \gamma_{pi} = 4,34 \cdot 10^3 N \sigma_{pi},$$

де N – кількість гідрометеорних часток в 1 м^3 .

Питомий коефіцієнт ослаблення є сумою γ_{pi} та γ_{pi} :

$$\gamma = 4,34 \cdot 10^3 N (\sigma_{pi} + \sigma_{pi}) = 4,34 \cdot 10^3 N \sigma_{\Sigma},$$

де $\sigma_{\Sigma} = \sigma_{pi} + \sigma_{pi}$ – ефективна площа ослаблення частинки.

Ефективні площі поглинання і розсіяння частинок істотно залежать від їх форми, розмірів, агрегатного стану і довжини електромагнітної хвилі.

Для сферичних частинок значення σ_{pi} і σ_{pi} можуть бути розраховані по формулах, отриманих Мі, які для частинок малих розмірів ($\pi d / \lambda \ll 1$, d – діаметр частинки), мають вигляд:

$$\sigma_{pi} = \frac{\pi^2 d^3}{\lambda} \text{Im} \left(-\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right), \quad \sigma_{pi} = \frac{2}{3} \frac{\pi^5 d^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2,$$

де: m – комплексний коефіцієнт заломлення речовини частинки, Im – уявна

частина комплексного числа, що стоїть в дужках.

Квадрат модулю і уявна частина відношення $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ характеризують вплив агрегатного стану гідрометеорної частинки на величину її ефективних площ поглинання і розсіяння. Для води квадрат модулю і уявна частина співвідношення $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ залежать від температури та довжини хвилі (табл. 2.1). Для льоду величини $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ і $\text{Im} \left(-\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$ практично не залежать від довжини хвилі, а залежать від температури (табл. 2.2).

Таблиця 2.1 – Значення квадрата модулю та уявної частини відношення

$\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ для води

Параметр	T, °C	λ, см			
		0,62	1,24	3,21	10,0
$\left \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right ^2$	20	0,8926	0,9193	0,9275	0,928
	10	0,8726	0,9152	0,9282	0,9313
	0	0,8312	0,9055	0,9300	0,9340
	-8	0,7921	0,8902		
$\text{Im} \left(-\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$	20	0,0915	0,0471	0,1883	0,00475
	10	0,1142	0,0615	0,0247	0,00688
	0	0,1441	0,0807	0,0335	0,1102
	-8	0,1713	0,1036		

Таблиця 2.2 – Значення квадрата модулю та уявної частини відношення

$\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ для льоду

Параметр	T, °C	Значення параметра
$\left \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right ^2$	При всіх температурах, якщо щільність 1 г/м ³	0,197
$\text{Im} \left(-\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$	0	9,6 · 10 ⁻⁴
	-10	3,2 · 10 ⁻⁴
	-20	2,2 · 10 ⁻⁴

Ослаблення електромагнітних хвиль в полідисперсних

гідрометеорних утвореннях, таких, наприклад, як хмари і опади, зручно для цілей практики пов'язувати з інтенсивністю опадів і водністю хмар.

Для найтипівіших законів розподілу крапель в дощах різної інтенсивності питомий коефіцієнт ослаблення визначають за допомогою емпіричної формули

$$\gamma = \beta I^\alpha,$$

де γ виражено в дБ/км, а I в мм/годину.

Значення коефіцієнтів β та α для різних довжин хвиль при температурі 18°C приведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнтів β та α для різних довжин хвиль при температурі 18°C

λ, см	0,096	0,20	0,43	0,62	0,90	1,24	1,8	3,2	5,6	10,0
β	1,53	1,24	1,08	0,37	0,22	0,12	0,045	0,007	0,002	0,0003
α	0,538	0,692	0,71	1,0	1,0	1,05	1,14	1,31	1,17	1,0

Ослаблення електромагнітної енергії в хмарах можна розрахувати, користуючись водністю, яка визначається співвідношенням

$$w = \frac{\pi \rho 10^{-3}}{6} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} N(d_i) d_i^3 d(d_i),$$

де d – діаметр частинок; d_{\max} , d_{\min} – максимальний і мінімальний діаметри частинок; $N(d_i)$ – функція розподілу частинок в одиниці об'єму повітря по діаметрах; ρ – густина речовини частинок (для краплинорідких хмар $\rho=1$).

Для крапельно-рідких хмар питомий коефіцієнт ослаблення виражається через водність наступним співвідношенням:

$$\gamma = \left[0,43 \frac{6\pi}{\lambda} \text{Im} \left(-\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \right] w.$$

У діапазоні хвиль $\lambda = 0,5 \div 10$ см величина множника, що стоїть в дужках, обернена пропорційна λ , тому цей вираз може бути представлений у вигляді

$$\gamma = 0,438 \frac{w}{\lambda^2}$$

Залежність γ від довжини хвилі при різній водності w хмар представлена на рис. 2.4 (штрихові лінії). На рис.2.4 також представлена залежність питомого коефіцієнта ослаблення γ від довжини хвилі при різній інтенсивності дощу і при температурі 18°C (суцільні лінії). Для визначення коефіцієнтів ослаблення при інших температурах вводять коригувальні поправочні коефіцієнти.

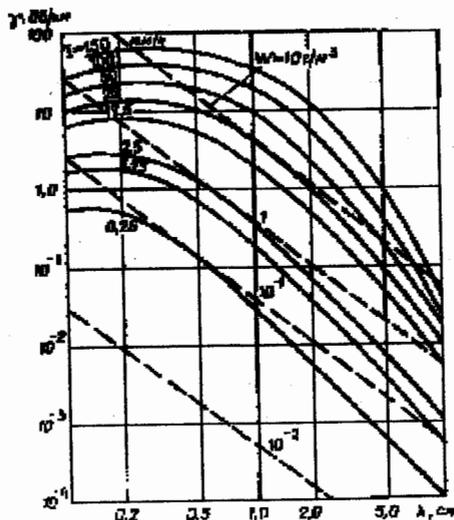


Рис. 2.4 – Залежність питомого коефіцієнта ослаблення електромагнітних хвиль від їх довжини при різній інтенсивності дощу з розподілом крапель по Маршаллу–Пальмеру і в хмарах з різною водністю при температурі 18°C

Ослаблення в граді і снігу складає всього декілька відсотків ослаблення в дощі тієї ж інтенсивності, що обумовлено малим значенням множників $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ та $\text{Im} \left(-\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$. Тому, якщо інтенсивність граду не дуже велика, ослабленням в граді можна нехтувати. Ослаблення в снігу, якщо він сухий, також дуже мало. Проте, якщо сніг мокрий, то в ньому ослаблення таке ж, як і в дощі тієї ж інтенсивності.

Ослаблення енергії електромагнітних хвиль знижує дальність дії РЛС. Хай потужність сигналу, що відбитий від метеопілі і який приймається РЛС, за відсутності ослаблення буде дорівнюватися P_0 . Тоді потужність відбитого сигналу, що приймається РЛС за наявності ослаблення, визначиться співвідношенням

$$P = P_0 10^{-0,2 \int_0^R \gamma_{\Sigma}(R) dR}$$

де: R – відстань від РЛС до цілі; $\gamma_{\Sigma}(R)$ – сумарний коефіцієнт ослаблення $\gamma_{\Sigma}(R) = \gamma_K + \gamma_{\text{вп}} + \gamma_{\text{хм}} + \gamma_{\text{оп}}$ де $\gamma_{\text{хм}}$, $\gamma_{\text{оп}}$ – коефіцієнти ослаблення в хмарах і опадах відповідно.

Величина множника $K_{\text{осл}} = 10^{-0,2 \int_0^R \gamma_{\Sigma}(R) dR}$, званого множником ослаблення, входить як поправочний коефіцієнт в рівняння, які визначають дальність дії РЛС. Величина його при певних метеорологічних умовах (опаді великої інтенсивності, хмари з великою водністю) може бути істотно менше за одиницю. Для систем радіозв'язку значення цього

коефіцієнта $K_{\text{осл}} = 10^{-0,1 \int_0^R \gamma_{\Sigma}(R) dR}$

Множник 0,2, що стоїть в показнику ступеня K стосовно радіолокаційних задач, враховує те, що електромагнітні хвилі проходять відстань R двічі (до цілі та назад).

Разом з тим, разом з шкідливим ефектом обмеження дальності дії, ослаблення електромагнітних хвиль дозволяє визначати водність хмар і інтенсивність опадів. Вимірюючи величину ослаблення і використавши значок питомого коефіцієнт ослаблення з водністю і інтенсивністю можна визначити w і I .

Крім того, розсіювання електромагнітної хвилі гідрометеорними частинками, разом з шкідливим ефектом ослаблення, призводить до формування відбитого сигналу, що несе інформацію про метеопілі. Цей сигнал формується за рахунок енергії, яка розсіяна в напрямі на РЛС. Кількість цієї енергії характеризується ефективною площею зворотного розсіювання частинок.

Під ефективною площею зворотного розсіювання (відбиття) частинки розумітимемо деякий нормальний радіопроменю площинку σ_0 , яка, рівномірно розсіює у всі сторони всю падаючу на нього від РЛС потужність, і створює в точці прийому ту ж щільність потоку потужності, що і реальна частинка.

Згідно теорії Мі величина ефективною площі зворотного розсіювання сферичної частинки, розміри якої задовольняють умові $\frac{\pi d}{\lambda} \ll 1$, виражається формулою

$$\sigma_0 = \frac{\pi^5 d^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

Іншим ефектом взаємодії електромагнітних хвиль з атмосферою є зміна швидкості їх поширення. Згідно теорії електромагнітного поля швидкість поширення електромагнітних хвиль в будь-якому середовищі визначається співвідношенням $v = c/n$, де c – швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі.

Коефіцієнт заломлення n залежить від метеопараметрів: температури, тиску, питомої вологості. А ці метеопараметри в свою чергу змінюються з

висотою. Следствием цього є відмінність від нуля вертикального градієнта коефіцієнта заломлення dn/dH . У свою чергу, наявність вертикального градієнта коефіцієнта заломлення приводить до явища радіорефракції – явища викривлення траєкторії поширення електромагнітних хвиль.

Розглянемо якісно фізичну картину цього явища. Припустимо, є неоднорідне середовище з різними діелектричними проникливостями ϵ_1 , та ϵ_2 (рис. 2.5), при цьому $\epsilon_1 > \epsilon_2$. Розглянемо положення фронту електромагнітної хвилі в два моменти часу t_1 і t_2 . Нехай в момент t_1 фронт займає положення, зображене на рис. 2.5. В момент t_2 відбудеться нахил фронту, оскільки швидкість поширення електромагнітної хвилі в середовищі з ϵ_2 буде більше (якщо $\epsilon_1 > \epsilon_2$, то $n_1 = \sqrt{\epsilon_1} > n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$).

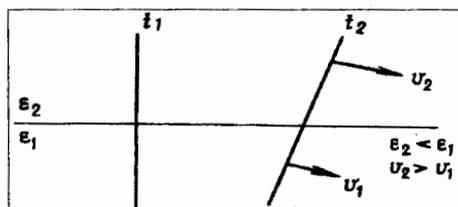


Рис. 2.5 – Пояснення явища рефракції

Наслідком нахилу фронту буде зміна напрямку поширення електромагнітної хвилі (напрямок поширення завжди нормальний фронту хвилі).

Явище рефракції може бути джерелом помилок визначення кутових координат і зміни дальності дії РЛС.

Розглянемо різні види рефракції радіохвиль і відповідні їм значення градієнта коефіцієнта заломлення dn/dH .

Залежно від характеру викривлення траєкторії радіохвиль (характеру викривлення радіопроменя) розрізняють три основні типи (рис. 2.6, табл. 2.4) рефракції:

- негативну;
- нульову;
- позитивну.

При нульовій рефракції радіопромінь залишається прямолінійним. Дальність радіолокаційного спостереження при нульовій рефракції визначається за формулою

$$R = 3,58 (\sqrt{H} + \sqrt{h})$$

де: R – дальність радіолокаційного спостереження в кілометрах; H , h – висоти цілі і антени РЛС відповідно в метрах.

Негативна рефракція виникає при позитивних значеннях градієнта коефіцієнта заломлення і викликає зменшення дальності радіолокаційного спостереження, оскільки радіопромінь відхиляється від земної поверхні.

Типові метеорологічні умови для даного виду атмосферної рефракції виникають при натіканні теплого вологого повітря на холодну підстильну поверхню при слабкому вітрі. Такі умови призводять до утворення інверсій температури і адвективно-радіаційних туманів.

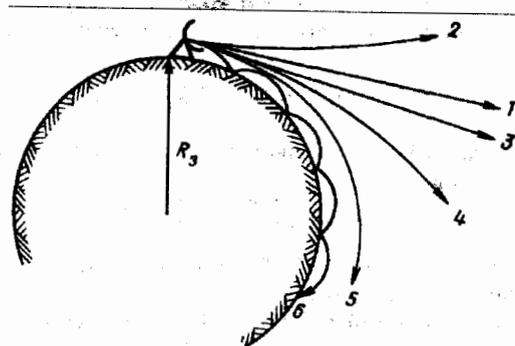


Рис. 2.6 – Траєкторії розповсюдження радіохвиль при різних типах рефракції

- 1 – нульова рефракція; 2 – негативна; 3 – нормальна (стандартна); 4 – підвищена; 5 – критична; 6 – надрефракція.

Таблиця 2.4 – Значення градієнтів коефіцієнта заломлення при різних типах рефракції

Тип рефракції	Значення градієнту dn/dH [1/м]
Негативна	>0
Нульова	0
Позитивна:	
знижена	от 0 до $-4 \cdot 10^{-8}$
нормальна	$-4 \cdot 10^{-8}$
підвищена	от $-4 \cdot 10^{-8}$ до $-15,7 \cdot 10^{-8}$
критична	$-15,7 \cdot 10^{-8}$
надрефракція	$< -15,7 \cdot 10^{-8}$

До явища негативної атмосферної рефракції можуть привести і такі метеорологічні умови, коли при дуже низьких температурах у Землі спостерігається невелика вологість повітря. Тоді за рахунок великих

вертикальних градієнтів температури і малих градієнтів вологості може спостерігатися явище збільшення n з висотою.

Позитивна рефракція виникає при негативних значеннях градієнту коефіцієнта заломлення і ділиться на знижену, нормальну, підвищену, критичну і надрефракцію. Нормальна рефракція відповідає умовам нормальної (стандартної) радіоатмосфери. Під стандартною радіоатмосферою розуміється атмосфера, для якої температура лінійно зменшується з висотою на $0,65^\circ\text{C}$ на кожні 100 метрів, тиск убуває за експоненціальним законом, а питома вологість за законом Хрґіана

$$q = q_0 e^{-N(b-Ne)}$$

де: b, c – коефіцієнти, залежні від сезону року; q_0 – питома вологість у поверхні Землі.

При нормальній рефракції дальність радіолокаційного спостереження визначається формулою

$$R = 4,12(\sqrt{H} + \sqrt{h})$$

Нормальна рефракція виникає при хорошому перемішуванні повітря у поверхні Землі при помірному вітрі.

При критичній рефракції $dn/dN = -15,7 \cdot 10^{-8}$ [1/м] радіус кривизни радіопроменя, направлено уздовж земної поверхні, дорівнює радіусу Землі і промінь огинає земну кулю.

При значенні $dn/dN < -15,7 \cdot 10^{-8}$ [1/м] виникає надрефракція. Радіус кривизни радіопроменя менше радіусу земної кулі, внаслідок чого промінь випробує багатократне відбиття від земної поверхні. Критична рефракція і надрефракція характеризуються наддалеким поширенням радіохвиль, яке пов'язане з утворенням атмосферних хвилеводів.

Явище надрефракції виникає за наступних метеорологічних умов:

- при натіканні теплого сухого повітря з материка на холоднішу морську поверхню влітку, що призводить при слабкому перемішуванні до зростання температури і зменшення пружності водяної пари (e) з висотою. Таке явище виникає і при натіканні холодного повітря з материка на теплішу водну поверхню, коли, не дивлячись на швидке зменшення температури з висотою, внаслідок дуже різкого зменшення e з висотою, значення dn/dN залишаються більше критичного;
- при безхмарній погоді вночі, коли в результаті нічного вихолодження повітря виникають приземні радіаційні інверсії температури, тумани, густі серпанки. У ранкові години з сходом Сонця починається посилене випаровування і помітне зменшення e з висотою;
- у областях антициклонів, коли низхідні рухи повітря призводять до так званих інверсій стиснення і утворення підведених атмосферних хвилеводів, які іноді можуть зливатися з приземними хвилеводами.

2.3 Рівняння радіолокації метеорологічних цілей

Основне рівняння радіолокації метеоцілей визначає залежність потужності сигналу, що приймається РЛС, від технічних параметрів станції, дальності до цілі, її мікрофізичної структури, умов поширення радіохвиль.

Виведемо основне рівняння радіолокації метеоцілей. Для цього визначимо значення потужності сигналу, прийнятого РЛС від однієї гідрометеорної частинки.

Нехай РЛС випромінює імпульс електромагнітної енергії тривалістю τ і імпульсною потужністю P_i . Виділимо в метеоцілі i -у гідрометеорну частинку A з діаметром d_i , віддалену від РЛС на відстань R (рис. 2.7). Визначимо потужність сигналу, відбитого від цієї частинки і прийнятого РЛС.

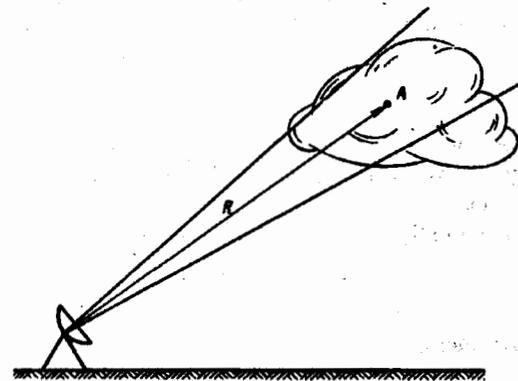


Рис 2.7 - Ілюстрація до виводу формули потужності сигналу, відбиваного гідрометеорною частинкою

Потужність сигналу, відбитого частинкою A , буде дорівнювати моменту щільності потоку потужності зондового сигналу в точці A на ефективну площу відбиття частинки

$$P_{\text{від}} = \Pi \sigma_{0i}$$

де Π – щільність потоку потужності зондового сигналу РЛС у точці розташування частинки; σ_{0i} – ефективна поверхня відбиття частинки з діаметром d_i .

Відомо, що $\sigma_{0i} = \frac{\pi^2 d_i^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$. Якби РЛС випромінювала потужність рівномірно (ізотропно) у всі сторони, то значення Π визначалося б виразом

$$S = \frac{P_i}{4\pi R^2}$$

Оскільки антена РЛС випромінює тільки в тілесному куту визначеному шириною діаграми направленості в кутомісній і азимутній площинах, то

$$S = \frac{P_i G}{4\pi R^2}$$

де G – коефіцієнт направленої дії антени РЛС.

З урахуванням останніх виразів отримаємо:

$$P_{від} = \frac{P_u G}{4\pi R^2} \frac{\pi^5 d_i^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

Щоб визначити потужність сигналу, прийнятого РЛС від цієї частинки, необхідно щільність потоку потужності відбитого сигналу в точці розташування РЛС помножити на ефективну площу антени (апертуру):

$$P_{при} = S_{вх} A,$$

де: $P_{при}$ – потужність сигналу, прийнятого РЛС від i -ої частинки; $S_{вх}$ – щільність потоку потужності сигналу, відбитого частинкою, на вході РЛС; A – ефективна площа антени.

Згідно визначенню $S_{вх}$ визначається виразом

$$S_{вх} = \frac{P_{від}}{4\pi R^2}$$

В результаті маємо

$$S_{вх} = \frac{P_u G}{16\pi^2 R^4} \frac{\pi^5 d_i^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

тоді

$$P_{при} = S_{вх} A = \frac{P_u G}{16\pi^2 R^4} \frac{\pi^5 d_i^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 A$$

Враховуючи, що $A = G\lambda^2/(4\pi)$, одержимо

$$P_{при} = \frac{P_u G^2}{64 R^4} \frac{\pi^2 d_i^6}{\lambda^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

Метеоціль складається з безлічі гідрометеорних частинок різних діаметрів, що відбивають електромагнітну енергію. Але не всі вони одночасно беруть участь в створенні відбитого сигналу. Відомо, що в

створенні відбитого сигналу одночасно беруть участь тільки частинки, що знаходяться усередині імпульсного (розрізняльного) об'єму РЛС. Величина цього об'єму буде

$$V = \frac{\pi c \tau_u}{8} R^2 \theta$$

Щоб знайти потужність сигналу, що приймається РЛС від частинок, укладених в цьому об'ємі, визначимо спочатку потужність сигналу, що приймається від частинок, укладених в одиничному об'ємі метеоцілі.

Нехай в одиничному об'ємі метеоцілі існує сукупність частинок з діаметром від d_1 до d_m . Причому, в цьому об'ємі є $N(d_1)$ часток з діаметром d_1 , $N(d_2)$ часток з діаметром d_2 і так далі, тобто концентрація частинок різних діаметрів описується функцією розподілу їх за розмірами $N(d_i)$.

Потужність сигналу, прийнятого від всіх частинок даного d_i діаметру, буде рівна сумі потужностей сигналів, прийнятих від кожної з частинок

$$P_{np} N(d_i) = N(d_i) P_{при} = N(d_i) \left[\frac{P_u G^2}{64 R^4} \frac{\pi^2 d_i^6}{\lambda^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \right]$$

Потужність, що приймається від всіх частинок, укладених в одиничному об'ємі, визначиться виразом

$$P_{np \Sigma N}(d_i) = \sum_{d_i} P_{np} N(d_i) = \frac{P_u G^2}{64 R^4} \frac{\pi^2}{\lambda^2} \sum_{d_i} N(d_i) d_i^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

Тепер очевидно, що потужність сигналу, що приймається РЛС від метеоцілі, може бути знайдена з наступного співвідношення:

$$P_{np} = P_{np \Sigma N}(d_i) V$$

Підставивши в цей вираз значення $P_{np \Sigma N}(d_i)$ і зробивши перетворення одержимо

$$P_{np} = \frac{\pi^3 P_u G^2 \theta^2 c \tau_u}{512 R^2 \lambda^2} \sum_{d_i} N(d_i) d_i^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

Одержаний вираз для потужності відбитого від метеоцілі сигналу непримодливий, якщо нехтувати впливом загасання електромагнітної енергії при її розповсюдженні і вважати, що метеоціль повністю заповнює діаграму спрямованості в кутомісній і азимутній площинах.

Насправді загасання електромагнітної енергії (особливо при локації на великій відстані) може виявитися значним, а метеоціль заповнюватиме діаграму спрямованості частково (рис. 2.8). Вплив часткового заповнення діаграми спрямованості може бути враховане коефіцієнтом заповнення КЗ, меншим від 0 до 1, а вплив загасання множителем ослаблення

$$K_{осл} = 10^{-0,2 \int_0^R \gamma_{\Sigma}(R) dR}$$

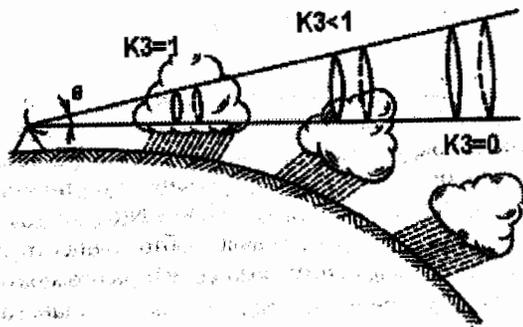


Рис. 2.8 – Ілюстрація до визначення коефіцієнта заповнення K_3

З урахуванням цих коефіцієнтів основне рівняння радіолокації записується в наступному кінцевому вигляді:

$$P_{np} = \frac{\pi^3 P_u G^2 \theta^2 c \tau_u}{512 R^2 \lambda^2} \sum_{d_i} N(d_i) d_i^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 K_3 10^{-0,2 \int_0^R \gamma_{\Sigma}(R) dR}$$

Отримана формула показує залежність потужності прийнятого РЛС сигналу:

- від технічних параметрів станції $P_u, \tau_u, G, \theta, \lambda$;
- від мікрофізичної структури метеоцілі (через множник $\sum_{d_i} N(d_i) d_i^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$);
- від водності хмар і інтенсивності опадів (через значення $\gamma_{обл} = 0,438 w / \lambda^2$ і $\gamma_{ос} = \beta I^{\alpha}$, котрі входять у $\gamma_{\Sigma}(R)$ показника ступеня коефіцієнта ослаблення).

Таким чином, при відомих технічних параметрах РЛС потужність прийнятого від метеоцілі сигналу є інформаційним параметром, що несе інформацію про мікрофізичну структуру хмар, опадів, їх водність і інтенсивність.

Основне рівняння радіолокації можна записати в компактнішій формі

$$P_{np} = P R^{-2} Z K_3 10^{-0,2 \int_0^R \gamma_{\Sigma}(R) dR}$$

де: $P = \frac{\pi^3 P_u G^2 \theta^2 c \tau_u}{512 \lambda^2}$ – потенціал метеорологічної РЛС;

$$Z = \sum_{d_i} N(d_i) d_i^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$
 – відбивна здатність метеоцілі, яка

визначається її мікрофізичною структурою.

Потужність сигналу, що приймається РЛС, пропорційна потенціалу РЛС і відбивної здатності метеоцілі. Відбивна здатність метеоцілей, надзвичайно сильно залежить від розмірів гідрометеорних частинок, що утворюють ціль (пропорційна шостому ступеню діаметру частинок).

Відбивна здатність, пропорційна множнику $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ значення якого визначає агрегатний стан (фазу) гідрометеорних частинок, що утворюють метеоціль. Множник цей для води рівний 0,96, для крижаних частинок – 0,16. Це означає, що відбивна здатність водяних частинок у 6 разів більше, ніж у крижаних. Але оскільки геометричні розміри крижаних частинок значно більше водяних, то може виявитися, що через це відбивна здатність крижаних хмар буде більше. На практиці виявляється, що хмари S_i, A_s виявляються метеорологічними РЛС краще, ніж A_s . Неоднозначна можливість Z утрудняє розпізнавання типу хмарності. Тому для надійності розпізнавання необхідно привертати додаткові інформативні ознаки.

Значення потужності сигналу, що приймається, в сильному ступені належить від умов поширення радіохвиль.

Вплив загасання радіохвиль на величину потужності сигналу, що приймається, може бути значним. Візьмемо, наприклад, хвилі довжиною 0,8 см і 3 см. Коефіцієнти загасання в газах складуть:

$$\text{для } \lambda = 0,8 \text{ см} - \gamma_{\Gamma} = \gamma_{\kappa} + \gamma_{вп} = 0,06 \text{ дБ/км};$$

$$\text{для } \lambda = 3 \text{ см} - \gamma_{\Gamma} = \gamma_{\kappa} + \gamma_{вп} = 0,01 \text{ дБ/км}.$$

Тоді коефіцієнти ослаблення K для цих довжин хвиль при видаленні цілі на 50 км від РЛС складають відповідно 0,35 і 0,8.

Не менш сильно впливають на зменшення потужності хмари і опади, що знаходяться на трасі поширення радіохвиль і розташовані між РЛС і метеоціллю. Так, наприклад, якщо протяжність хмар і опадів, що екранують метеоціль, складе 50 км, а їх водність $w = 1 \text{ г/м}^3$ і інтенсивність $I = 1 \text{ мм/год}$, то ослаблення в хмарах складе 78% для $\lambda = 0,8 \text{ см}$ і 11% для $\lambda = 3 \text{ см}$. Ослаблення в дощі складе 44% для $\lambda = 0,8 \text{ см}$ і 4% для $\lambda = 3 \text{ см}$.

Приведені дані свідчать, що ослаблення потужності сигналу, що приймається, в міліметровому діапазоні хвиль ($\lambda = 0,8 \text{ см}$) вельми значне.

Закон розподілу частинок за розмірами в хмарах і опадах носить виражений регіональний характер, тому зв'язок між радіолокаційною відбиваністю дощу і його інтенсивністю і між радіолокаційною відбиваністю хмар і їх водністю для різних районів буде різним. Так, для широт задовільно узгоджуються з експериментальними даними

наступні залежності:

$$\text{для дощу } Z = 200 I_d^{1,6},$$

$$\text{для снігу } Z = 2000 I_{\text{сн}}^2,$$

$$\text{для хмар з } d \leq 29 \text{ мкм та } w \leq 1,3 \text{ г/м}^3 \quad Z = 0,048 W^2$$

де: I_d – інтенсивність дощу в мм/год, $I_{\text{сн}}$ – інтенсивність снігопаду, перерахована на воду в мм/год, W – водність хмар в г/м³.

Контрольні запитання

- 1 Зв'язок діелектричної проникливості речовини з діелектричною сприйнятливістю складових атмосфери – газів, водної пари та водної аерозолі
- 2 Фізичне пояснення впливу метеопараметрів атмосфери на діелектричну проникність
- 3 Охарактеризуйте процеси взаємодії електромагнітних хвиль з атмосферою
- 4 Що таке ефективна площа поглинання та розсіювання частинки?
- 5 Зв'язок питомого коефіцієнту ослаблення з інтенсивністю та водністю
- 6 Як вводять множник послаблення для електромагнітних хвиль стосовно радіолокаційних задач?
- 7 Як записати потужність сигналу, відбитого гідрометеорологічною частинкою?
- 8 Розрізняльний об'єм РЛС
- 9 Поняття про коефіцієнт заповнення діаграми направленості
- 10 Основне рівняння радіолокації
- 11 Охарактеризуйте змістовні складові основного рівняння радіолокації
- 12 Що таке потенціал метеорологічної РЛС?
- 13 Що таке відбивна здатність метеоцілі?
- 14 Наведіть формули зв'язку між відбивною здатністю і інтенсивністю та водністю

3 Радіолокаційне зондування навколишнього середовища

3.1 Імпульсні метеорологічні радіолокаційні станції

Вимоги до метеорологічних РЛС (МРЛС). Імпульсні МРЛС в основному використовуються для виявлення і дослідження хмар і опадів. Вони дозволяють завчасно отримати інформацію по великих областях про особливо небезпечні атмосферні процеси (зливові дощі, грози, град), знаходити зони опадів і визначати їх розміри і, нарешті, досліджувати

просторово-часову динаміку метеорологічних процесів і їх характеристик.

МРЛС мають багато спільного з РЛС, використаних для інших цілей. Однак існують специфічні вимоги до РЛС метеорологічного призначення, які обумовлені особливостями метеорологічних процесів. До них, перш за все, відносяться:

- виключно великий діапазон зміни ефективних площ розсіяння (ЕПР) атмосферних утворень, який сягає 100 дБ,
- значні вертикальні і горизонтальні розміри утворень, що перевищують геометричний об'єм елемента розрізняння РЛС,
- відносно мала швидкість руху,
- велика просторово-часова мінливість.

Для забезпечення найбільшої дальності виявлення атмосферних утворень з малою ЕПР енергетичний потенціал станції повинен бути по можливості великий, тобто потужність передавача і чутливість приймача МРЛС повинні бути максимальними.

Приймальні пристрої МРЛС повинні мати великий динамічний діапазон, що обумовлено великим діапазоном значень потужності сигналів, відбитих від хмар і опадів. Схеми приймачів повинні забезпечувати можливість посилення потужних сигналів у меншій мірі, ніж слабких, що реалізується, наприклад, за допомогою підсилювачів проміжної частоти з логарифмічною амплітудною характеристикою.

Для підвищення потужності сигналів, які надходять від метеоцілі, і одержання високого кутового розрізняння в МРЛС бажано мати якомога потужні діаграми направленості використовуваних антен. При цьому огляд напрямків цілей практично не погіршується, не дивлячись на достатньо великі їх геометричні розміри. Такі діаграми направленості формуються, як правило, круглими параболічними відбивачами антен і мають ширину в частотки градуса.

При вузьких діаграмах направленості швидкість огляду повинна бути мала, а частота повторення імпульсів велика для того, щоб забезпечити достатньо велике число імпульсів, що опромінують ціль і, отже, більш надійніше виявлення.

Немає необхідності отримувати високу розрізняльну здатність по дальності, оскільки метеорологічні цілі мають значну просторово-часову мінливість.

Важливим для МРЛС є питання про вибір довжини хвилі, яке вирішується з урахуванням розсіювачих властивостей зондованих об'єктів і послаблюючих властивостей атмосфери.

Однією з основних вимог до МРЛС є здатність проводити кількісні вимірювання потужності сигналів, відбитих від атмосферних утворень. Для цього в їх склад вводять спеціальні пристрої вимірювання потужності відбитих сигналів, побудованих за принципом атенюаторів.

Метеорологічні РЛС повинні забезпечувати зондування об'єктів середовища, як в горизонтальній, так і у вертикальній площині. Для цього в їх складі є індикатори кругового огляду (ІКО) і індикатори дальність-висота (ІДВ).

У поточний час в практиці метеорологічних радіолокаційних вимірювань в основному використовуються імпульсні метеорологічні радіолокаційні станції типу МРЛ-5, рідкіше МРЛ-2. Раніше використовувалася станція типу МРЛ-1, яка була двоканальною станцією, що працювала в двох діапазонах хвиль – міліметровому (І канал) і сантиметровому (ІІ канал). Перший канал використовувався для дослідження опадів, а також для виявлення хмар на невеликій відстані від РЛС, вимірювання висоти їх верхньої і нижньої меж. ІІ канал використовувався для виявлення і дослідження потужних конвективних хмар і пов'язаних з ними явищ. МРЛ-2 є одноканальною сантиметровою МРЛС, що призначена для тих же цілей, що і МРЛ-1 (ІІ канал). РЛС МРЛ-5 працює на двох довжинах хвиль 3 і 10 см. На відміну від МРЛ-2, в цій РЛС індикатори ІКО і ІДВ суміщені на одній електронно-променевої трубці. У ній передбачена можливість автоматичного знімання отриманої інформації в цифровому коді, що дозволяє здійснити її сполучення з ЕОМ. РЛС МРЛ-5 спеціально призначена для дослідження градових процесів і штормового сповіщення. РЛС МРЛ-4 працює на довжині хвилі 3 см і є одноканальною модифікацією МРЛ-5 на базі І каналу. МРЛ-6 працює на хвилі 10 см і є одноканальною модифікацією МРЛ-5 на базі ІІ каналу). У табл. 1 приведені деякі характеристики МРЛС.

У основу роботи МРЛС МРЛ-2 покладено імпульсний метод радіолокації з пасивною відповіддю. На рис. 3.1 представлена структурна схема станції.

Випромінювання електромагнітної енергії в простір здійснюється параболічною антеною з вузькою діаграмою направленості. Якщо на шляху поширення випромінюючої електромагнітної енергії зустрічаються об'єкти, фізичні властивості яких (зокрема, діелектрична проникність) відрізняються від фізичних властивостей середовища, то відбувається явище відбиття (розсіяння) у всі сторони, у тому числі і в напрямку на РЛС. Відбиті (розсіяні) сигнали приймаються тією ж антеною, і по хвилеводному тракту поступають в приймальний пристрій, де після посилення і перетворення поступають в систему «ізолуна» і далі на екрані індикаторів. Залежно від введеного оператором рівня ослаблення на екрані індикаторів з'являються відображення об'єктів, рівень яких перевищує цей рівень обмеження.

Синхронізація роботи станції здійснюється синхронізуючими імпульсами, що поступають з блоку запуску БЗ-003. Управління антеною здійснюється з пульта метеоролога через шафу управління приводом ШВ-

01 Управління антеною в програмному режимі здійснюється за допомогою програмного блоку БП-015 за участю блоку логіки БП-003. Синхронізуючі сигнали на відхилюючі системи ІКО та ІДВ поступають індикаторів азимута і кута місця, розміщених в блоці БЧ-006 і пов'язаних з механізмами гойдання і обертання антени.

Таблиця 3.1 – Характеристики МРЛС

Параметр	МРЛ-1		МРЛ-2	І канал МРЛ-5 або МРЛ-4	ІІ канал МРЛ-5 або МРЛ-6
	І канал	ІІ канал			
Переносна частота, МГц		9595	9595	9595	2950
Довжина хвилі, см	0,8	3,14	3,14	3,14	10,15
Імпульсна потужність, кВт	65	150	150	160	510
Тривалість імпульсу, мкс	0,45	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2
Число повторення, Гц	600	600 300	600 300	500 250	500 250
Чутливість приймача, дБ/Вт	-115	-128	-132	-134	-136
Діаметр відбивача, м					
у режимі градозахисту	3	3	3	1,4	4,5
у режимі штормоповіщення	3	3	3	4,5	4,5
Ширина діаграми, мін					
у режимі градозахисту	13	44	44	90	90
у режимі штормоповіщення				30	90
Коефіцієнт посилення антени	$6 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
Швидкість обертання антени	6	6	6	0...6	0...6
Імпульсний струм, об/хв					
Споживана потужність від мережі 3x220x50 або 1x110x50, кВт		25	19	14	14

У хвилеводному тракці блоком надуву підтримується надмірний тиск і ціллю запобігання електричному пробію в хвилеводному тракці. Випромінювана передавачем електромагнітна енергія вимірюється вбудованим вимірником потужності і контролюється стрілочним приладом. Коефіцієнт шуму приймального пристрою контролюється вимірником коефіцієнта шуму (блок БТ-011). Крім того, здійснюється імпульсний контроль чутливості і посилення приймального пристрою.

У основу роботи МРЛС МРЛ-5 також покладений імпульсний метод пасивної радіолокації з пасивною відповіддю. Ця РЛС є двоххвильовою метеорологічною радіолокаційною станцією, яка використовується в

режимі штормооповіщення або градозахисту. Режим штормооповіщення може здійснюватися на кожному з каналів, а режим градозахисту реалізується при спільній роботі обох каналів. Структурна схема МРЛС МРЛ-5 наведена на рис. 3.2.

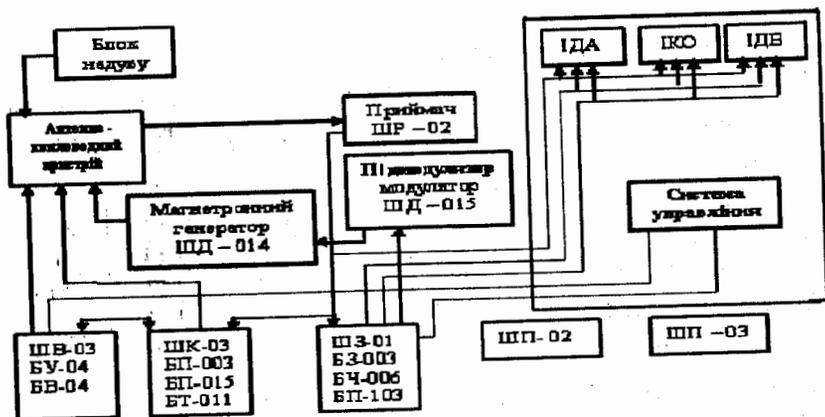


Рис. 3.1 – Структурна схема МРЛ-2

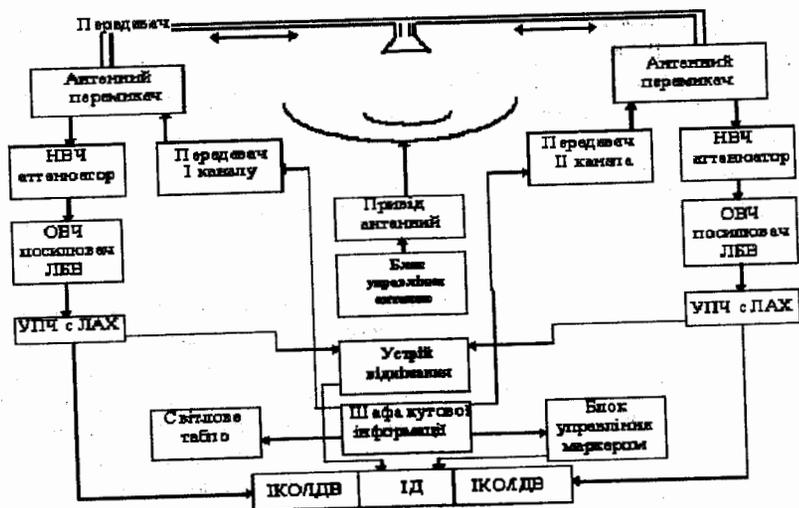


Рис. 3.2 – Структурна схема МРЛ-5

Особливістю антени МРЛ-5 є поєднання двох антен в одному миттєвому блоці, який складається з великого і малого параболічного відбивача і зведеного, дводіапазонного рупорного випромінювача. Діаметр розкриття великого відбивача дорівнює 4,5 м, а його робоча поверхня виконана з суцільного металевого листу. Діаметр розкриття малого відбивача дорівнює 1,4 м. Його робоча поверхня виконана з двох шарів ізоляризованої тканини, в яку вмонтована металізована сітка паралельних провідників. Завдяки такій структурі поверхні цього відбивача він виявляється радіопрозорим для хвиль, поляризація яких ортогональна провідникам сітки, і відбиває хвилі з поляризацією, паралельною провідникам. Таким чином, малий відбивач є радіопрозорим для хвиль другого каналу і еквівалентний металевій поверхні для першого каналу.

Дводіапазонний випромінювач складається з великого рупора, в який вбудований малий рупор так, що їх подовжні осі співпадають. Подібна конструкція забезпечує роботу в режимі градозахисту з однаковими діаграмами направленості в обох каналах, рівними $1,5^\circ$. При переході в режим штормооповіщення малий відбивач знімається, обидва рупори опромінюють всю поверхню великого відбивача, внаслідок чого діаграма направленості першого каналу звужується до $0,5^\circ$, а діаграма направленості другого каналу залишається незмінною.

Передавачі обох каналів складаються з магнетронних генераторів, модуляторів і підмодуляторів. Модулятори виконані по тиратронно-тиратронній схемі. Тиратронний зарядний пристрій, що входить до складу модулятора, здійснює перетворення низької постійної напруги на вході (220 В) у високовольтну напругу (16 кВ), за допомогою якого здійснюється заряд лінії формування тиратронного модулятора.

Приймальні пристрої обох каналів виконані по супергетеродинній схемі, з підсилювачем високої частоти на лампі бігучої хвилі, з автоматичним підстроюванням частоти і стабілізацією посилення і контролем точності установки проміжної частоти.

Посилення сигналів у великому динамічному діапазоні забезпечується УПЧ з логарифмічною амплітудною характеристикою (ЛАХ). У приймачах здійснюється автоматичний контроль коефіцієнта шуму і посилення приймального тракту. Якісні вимірювання потужності відбитих сигналів виконуються в НВЧ тракці атенюаторами. Схеми і конструкції приймальних пристроїв обох каналів максимально уніфіковані і відрізняються один від одного лише НВЧ трактами (НВЧ атенюатори, лампи бігучої хвилі). Всі технічні характеристики, окрім чутливості, цінникові, а елементи тракту проміжної частоти є взаємозамінними.

Індикаторні пристрої включають два індикатори – ІКО/ІДВ і індикатор типу А (ІД) на базі осцилографа С1-55. Перші суміщують в собі функції індикатора кругового огляду в полярних координатах азимут –

похила дальність (ІКО) і індикатора в прямокутних координатах горизонтальна дальність – висота (ІДВ).

Апаратура вимірювання і обробки луна-сигналів метеоцілей служить для вимірювання потужності сигналів, відбитих від метеоутворень і визначення розмірів градових частинок. Вимірювання потужності сигналів проводиться за допомогою пристроїв «ізолуна», розташованих на вході приймачів обох каналів і виконаних на базі напівпровідникових атенуаторів НВЧ.

Апаратура кутової інформації забезпечує видачу азимута метеоцілей в розподілах кутотіра та градуссах з високою точністю (0,1°), обчислення висоти і горизонтальної дальності, а також сполучення з апаратурою автоматизованої обробки даних.

Контрольно-вимірювальна апаратура дозволяє оперативну на стрілочних приладах здійснювати контроль коефіцієнта шуму (чутливості) і посилення приймальних пристроїв, а також енергетичного потенціалу станції.

Світлове табло забезпечує оперативне знімання і фотореєстрацію дати, часу, номера каналу спостереження, знак норми енергетичного потенціалу РЛС, рівень ізолюни через 6 дБ, масштаб, азимут (у градуссах і розподілах кутотіра), кут нахилу антени, горизонтальну і похилу дальності, висоту вибраної на індикаторі метеоцілі.

3.2 Радіолокаційне зондування навколишнього середовища за допомогою імпульсних радіолокаційних станцій

Вимірювання інтенсивності опадів і водності хмар за даними радіолокаційних спостережень. Радіолокаційна відбиваність хмар і опадів

$$Z = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} N(d) d^6 d(d)$$

залежить від розподілу частинок $N(d)$ і від їх розмірів.

Від цих же факторів залежать такі метеорологічні параметри, як водність хмар

$$w = \frac{\pi}{6} \rho \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} N(d) d^3 d(d)$$

та інтенсивність дощу

$$I = \frac{\pi}{6} \rho \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} N(d) d^3 v(d) d(d),$$

де: ρ – щільність гідрометеорологічних частинок; $v(d) = Cd^p + u_B$

швидкість падіння крапель у поверхні Землі; C – стала; $\beta = 1$; $\beta = 0,78$; та $\beta = 0,5$ для крапель відповідно діаметром 0,2-1,2 мм, 0,4-3,4 мм і 0,8-5 мм, u_B – вертикальна складова швидкості вітру.

Таким чином, метеорологічні параметри – водність w і інтенсивність опадів I – пов'язані з радіолокаційними відбиттям функціональними залежностями. Змірявши відбиття Z атмосферних утворень за допомогою цих залежностей можна, у принципі, розрахувати метеорологічні параметри w і I .

Проте функціональний зв'язок між величинами Z , I , w можна використати тільки тоді, коли відомо закони розподілу дощових і хмарних крипель за розмірами, а також швидкістю падіння дощових крапель.

Аналіз спектрів розмірів крапель хмар і дощів вказує на їх велику мінливість.

Тому на практиці використовують емпіричні формули: $Z = A I^b$ і $Z = A_0 w^{b_0}$, де Z зміряно в $\text{мм}^6/\text{м}^3$; w – в $\text{г}/\text{м}^3$ і I – в $\text{мм}/\text{год}$.

Коефіцієнти A_0 і b_0 мають наступні значення: для хмар з розмірами крипель $d_i \leq 30$ мкм та водністю $0 \leq w \leq 1,3$ $\text{г}/\text{м}^3$ $A_0 = 0,048$ і $b_0 = 2$; для крупних частинок в хмарах шаруватих форм $A_0 = 1380$ і $b_0 = 1,07$; для дощових крапель $A_0 = 5,3 \cdot 10^3$ та $b_0 = 1,82$.

Параметри A та b для інтенсивностей дощів у діапазоні хвиль 10...2 см зникаються у межах $9 \leq A \leq 2000$ та $1,3 \leq b \leq 2,1$.

Помірним широтам краще всього відповідають значення $A = 2000$ і $b = 2$ для снігопаду і $A = 209$ і $b = 1,69$ для дощу.

Ідея цього методу вимірювання I і w з використанням наведених співвідношень полягає у тому, що, змірявши за допомогою МРЛ значення Z , розраховують значення I і w . Проте великий розкид параметрів A_0 , b_0 , b і A значно знижує точність радіолокаційного методу вимірювання I і w .

Другий принцип вимірювання інтенсивності опадів полягає у вимірюванні послаблення радіохвиль в дощі, яке пов'язано з інтенсивністю формулою

$$\gamma_d = \beta I^\alpha$$

Параметри β та α змінюються в набагато вужчих межах, що дає можливість призводити вимірювання I з більш високою точністю.

Вимірювання ослаблення радіохвиль засноване на порівнянні середньої потужності відбитих сигналів РЛС, працюючої на двох довжинах хвиль λ_1 і λ_2 . При цьому діапазони хвиль вибирають так, щоб їх ослаблення в дощах помітно розрізнялося. Даний метод вимірювання інтенсивності дощів зручно використовувати в метеорологічних радіолокаційних станціях МРЛ-1 і МРЛ-5, що є на мережі і є двоххвильовими.

Розглянемо докладніше цей метод.

Зміряємо потужності сигналів, відбитих краплями дощу, замкненими

в двох імпульсних об'ємах, що знаходяться на відстані R_2 і R_1 (рис. 3.3).

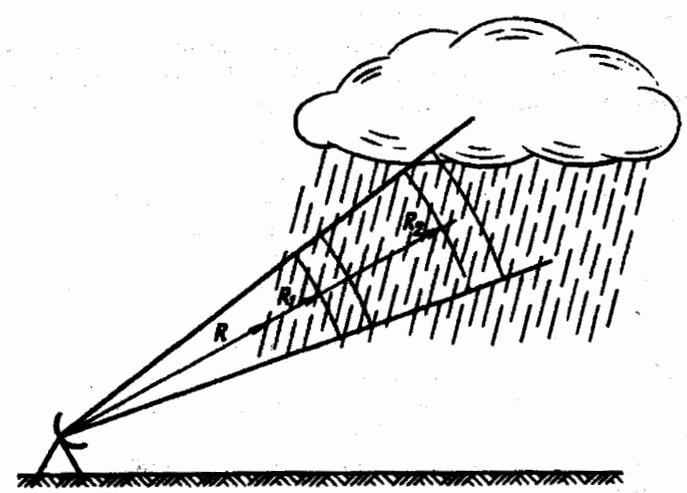


Рис. 3.3 – Вимірювання інтенсивності опадів радіолокаційним методом на двох довжинах хвиль

Потужність відбитого сигналу, прийнятого від імпульсного об'єму, віддаленого на відстані R_1 :

$$P_{np11} = \Pi_1 Z_{11} R_1^{-2} K_3 K_{oc11},$$

$$P_{np12} = \Pi_2 Z_{12} R_1^{-2} K_3 K_{oc12},$$

де: P_{np11} , P_{np12} – потужності приймаючих сигналів від першого імпульсного об'єму на довжинах хвиль λ_1 і λ_2 відповідно;

Π_1 , Π_2 – потенціали РЛС на довжинах хвиль λ_1 та λ_2 ;

Z_{11} , Z_{12} – радіолокаційні відбивні здатності дощових крапель, які укладені в першому імпульсному об'ємі на довжинах хвиль λ_1 і λ_2 відповідно;

K_{oc11} , K_{oc12} – коефіцієнти ослаблення відбитого сигналу, який прийнятий від першого імпульсного об'єму довжинах хвиль λ_1 та λ_2 відповідно.

Для сигналу, відбитого від другого імпульсного об'єму, аналогічно запишемо:

$$P_{np21} = \Pi_1 Z_{21} R_2^{-2} K_3 K_{oc21},$$

$$P_{np22} = \Pi_2 Z_{22} R_2^{-2} K_3 K_{oc22},$$

Значення коефіцієнтів ослаблення K_{oc11} , K_{oc12} , K_{oc21} , K_{oc22} визначаються за формулами:

$$K_{oc11} = 10^{-0,2 \left[\int_0^{R_1} \gamma_{Г1} dR + \int_R^{R_1} \gamma_{Д1} dR + \int_R^{R_1} \gamma_{обл1} dR \right]}$$

$$K_{oc12} = 10^{-0,2 \left[\int_0^{R_1} \gamma_{Г2} dR + \int_R^{R_1} \gamma_{Д2} dR + \int_R^{R_1} \gamma_{обл2} dR \right]}$$

$$K_{oc21} = 10^{-0,2 \left[\int_0^{R_2} \gamma_{Г1} dR + \int_R^{R_2} \gamma_{Д1} dR + \int_R^{R_2} \gamma_{обл1} dR \right]}$$

$$K_{oc12} = 10^{-0,2 \left[\int_0^{R_2} \gamma_{Г2} dR + \int_R^{R_2} \gamma_{Д2} dR + \int_R^{R_2} \gamma_{обл2} dR \right]}$$

де: $\gamma_{Г1}$, $\gamma_{Г2}$, $\gamma_{Д1}$, $\gamma_{Д2}$, $\gamma_{обл1}$, $\gamma_{обл2}$ – коефіцієнти питомого ослаблення радіохвиль в газах атмосфери, дощі і хмарах на хвилях λ_1 і λ_2 відповідно;
 R – похила дальність до ближньої межі зон опадів (рис. 3.3).

Знайдемо відношення P_{np11}/P_{np12} і P_{np21}/P_{np22} . Вважаючи, що питомі коефіцієнти поглинання не залежать від дальності R , одержимо:

$$\frac{P_{np11}}{P_{np12}} = \frac{Z_{11} R_2^2}{Z_{12} R_1^2} 10^{-0,2 \gamma_{\Sigma 1} (R_2 - R_1)}$$

$$\frac{P_{np21}}{P_{np22}} = \frac{Z_{21} R_2^2}{Z_{22} R_1^2} 10^{-0,2 \gamma_{\Sigma 2} (R_2 - R_1)}$$

де: $\gamma_{\Sigma 1} = \gamma_{Г1} + \gamma_{Д1} + \gamma_{обл1}$, $\gamma_{\Sigma 2} = \gamma_{Г2} + \gamma_{Д2} + \gamma_{обл2}$ – сумарні коефіцієнти поглинання радіохвиль на довжинах хвиль λ_1 і λ_2 .

Позначимо $P_{np11}/P_{np12} = P_1$, $P_{np21}/P_{np22} = P_2$, тоді, логарифмуючи, одержимо:

$$\lg P_1 = \lg \frac{Z_{11} R_2^2}{Z_{12} R_1^2} - 0,2 \gamma_{\Sigma 1} (R_2 - R_1)$$

$$\lg P_2 = \lg \frac{Z_{21} R_2^2}{Z_{22} R_1^2} - 0,2 \gamma_{\Sigma 2} (R_2 - R_1)$$

Якщо вважати, наприклад, що ослаблення радіохвиль на довжині хвилі λ_2 істотно менше, ніж на λ_1 , то будемо мати $\gamma_{\Sigma 1} \gg \gamma_{\Sigma 2}$.

Тоді після перетворень отримаємо

$$0,2\gamma_{\Sigma 1}(R_2 - R_1) = \lg \frac{P_2}{P_1} + \lg \frac{Z_{11}Z_{22}}{Z_{12}Z_{21}}$$

Переходячи до децибелів та вирішуючи відносно γ , отримаємо

$$\gamma_{\Sigma 1} = \frac{10 \lg \frac{P_2}{P_1} + 10 \lg \frac{Z_{11}Z_{22}}{Z_{12}Z_{21}}}{2(R_2 - R_1)}$$

Розкриваючи значення $\gamma_{\Sigma 1}$ знайдемо

$$I = \left\{ \frac{1}{\beta} \left[\frac{\xi_P - \xi_Z}{2(R_2 - R_1)} - (\gamma_{\Gamma 1} + \gamma_{обл 1}) \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}}$$

де

$$\xi_P = 10 \lg \frac{P_{np 21} P_{np 12}}{P_{np 22} P_{np 11}}, \quad \xi_Z = 10 \lg \frac{Z_{11} Z_{22}}{Z_{12} Z_{21}}$$

За допомогою цих формул можна знайти середню інтенсивність дощу, якщо відомі відношення потужностей відбитих сигналів, коефіцієнти ослаблення радіохвиль в газах і хмарах на довжині хвилі, що має більше ослаблення.

Одну з хвиль РЛС слід вибирати в діапазоні 3-6 см або 10 см, іншу, відповідно, в міліметровому діапазоні або в діапазоні 3-6 см. Для хвиль завдовжки 0,8 см і 3 см вимірювання потрібно проводити при $(R_2 - R_1) \approx 10$ км.

Вимірювання потужності радіолуни з точністю 1,5 дБ на хвилях $\lambda_1 = 0,34$ см і $\lambda_2 = 3$ см при $(R_2 - R_1) \approx 3$ км забезпечує визначення майже всіх значень I , що зустрічаються в природі.

Вимірювання водності хмар, засноване на вимірюванні ослаблення радіохвиль, здійснюється аналогічним чином, але з використанням співвідношення

$$\gamma_{обл} = \beta w^a$$

При використуванні радіолокаційних методів вимірювання інтенсивності опадів і водності хмар слід враховувати, що РЛС визначає середню інтенсивність опадів і вологість хмар в межах імпульсного об'єму, розміри якого у міру видалення від РЛС можуть бути вельми значними.

Так, наприклад, при $R = 10$ км, $\tau_n = 1$ мкс та $\theta = 1^\circ$ величина імпульсного об'єму V має значення $4,4 \cdot 10^6$ м³.

Радіолокаційний метод дає можливість практично миттєво визначати середнє значення інтенсивності опадів, віднесене до площі, відповідної

проекції вказаного об'єму на поверхні Землі. Для приведених вище даних ця площа рівна $2,6 \cdot 10^4$ м².

Найважливіша перевага радіолокаційного методу полягає у тому, що забезпечується одночасне і дистанційне вимірювання кількості і інтенсивності опадів на великих площах в радіусі 100 – 150 км. Недоліки пов'язані з тим, що радіолокаційний метод є непрямим, оскільки інтенсивність опадів складним чином визначається по змряній величині інтенсивності відбитих сигналів.

1.1 Радіолокаційне зондування навколишнього середовища за допомогою доплерівських радіолокаційних станцій

Отримання метеорологічної інформації за допомогою доплерівських РЛС метеорологічного призначення. Метеорологічні доплерівські РЛС призначені для вимірювання швидкостей переміщення хмар, опадів, невидимих неоднорідностей тропосфери, зграй птахів (орнітологічних цілей) і комах, а також для вимірювання швидкостей рухів рухомих частинок усередині атмосферних утворень.

Гідрометеорні частинки атмосферних утворень беруть участь в складних рухах: під дією вітру вони переміщуються в горизонтальному напрямку у складі всієї освіти; під дією гравітаційних сил, висхідних і нисхідних повітряних потоків вони беруть участь у вертикальних рухах; внаслідок турбулентних рухів вони хаотично переміщуються в просторі. Внаслідок вказаних переміщень відбитих частинок частота прийнятих радіолокаційних сигналів відрізнятиметься від частоти зондовних сигналів РЛС, тобто матиме місце доплерівський зсув частоти.

Впорядкований рух атмосферних утворень як системи відбитих частинок, визначає середній доплерівський зсув частоти, а рух окремих відбитих частинок один щодо одного впливає на ширину спектру доплерівських частот. Аналізуючи спектр прийнятого сигналу можна отримати інформацію про рух як метеоцілі в цілому, так і про рух гідрометеорних частинок всередині метеоцілі.

Доплерівський зсув частоти пов'язаний тільки з радіальним переміщенням відбитих частинок (радіальними швидкостями). Тому за допомогою доплерівських РЛС можливе вимірювання лише радіальних швидкостей. Для отримання повного вектора швидкості метеоцілі або спектру повного вектора переміщення окремих гідрометеорних частинок необхідно мати три доплерівські РЛС, що опромінюють вибрану для дослідження метеоціль з різних напрямків.

Вихідним пристроєм метеорологічних доплерівських РЛС є аналізатор спектру доплерівських частот. Аналізатор спектру представляє або систему вузькосмугових фільтрів, кожний з яких налаштований на

певну частоту, віддалену від сусідньої на величину смуги пропускання фільтру, або вузькосмуговий фільтр з перестроюванням по частоті в межах всього діапазону можливих змін доплерівських частот.

При використанні доплерівських РЛС з безперервним випромінюванням метеорологічна інформація укладена в доплерівській частоті або спектрі доплерівських частот безперервного вихідного сигналу. У разі застосування когерентно-імпульсних РЛС метеорологічна інформація укладена в змінах амплітуд відбитих імпульсів, внаслідок чого повинен аналізуватися спектральний склад огинаючих імпульсних сигналів на виході радіоприймального пристрою.

Зв'язок спектру флуктуації відбитого сигналу з швидкостями руху гідрометеорних частинок. Розглянемо спочатку простий приклад. Хай в розрізняльному (імпульсному) об'ємі РЛС є дві частинки, рухомі щодо РЛС з радіальними швидкостями V_{r1} і V_{r2} .

При опромінуванні цих частинок зондовним імпульсом утворюється відбитий сигнал, описуваний таким чином:

$$S(t) = a_1 S_3 \cos \left(\omega - \frac{2V_{r1}}{c} \omega \right) t + a_2 S_3 \cos \left(\omega - \frac{2V_{r2}}{c} \omega \right) t$$

де: a_1, a_2 – відбивні здатності частинок.

Вважаючи для простоти $a_1 = a_2 = a$ і використовуючи формулу для суми косинусів, маємо

$$S(t) = 2a S_3 \cos \frac{V_{r1} - V_{r2}}{c} \omega t \cos \left(\omega - \frac{V_{r1} + V_{r2}}{c} \omega \right) t$$

Позначимо

$$2a S_3 \cos \frac{V_{r1} - V_{r2}}{c} \omega t = A(t)$$

можемо записати

$$S(t) = A(t) \cos \left(\omega - \frac{V_{r1} + V_{r2}}{c} \omega \right) t$$

З цього виразу витікає, що амплітуда $A(t)$ відбитого сигналу змінюється з частотою Ω , яка дорівнюється половині різниці доплерівських частот, обумовлених рухом частинок

$$\omega = \frac{V_{r1}}{c} \omega - \frac{V_{r2}}{c} \omega = \frac{1}{2} (\omega_{\lambda 1} - \omega_{\lambda 2})$$

де: $\omega_{\lambda 1}, \omega_{\lambda 2}$ – доплерівські частоти, які обумовлені рухом першої та другої частинок відповідно. Частота Ω пропорційна різниці швидкостей частинок.

Переносна частота відбитого сигналу зсунута щодо переносної частоти зондового сигналу на величину $\omega(V_{r1} + V_{r2})/c$, рівну половині суми доплерівських частот $\omega_{\lambda 1}$ і $\omega_{\lambda 2}$ і пропорційну середній радіальній

швидкості частинок.

Таким чином, вимірюючи середнє значення доплерівської частоти відбитого сигналу, можна зміряти середню радіальну швидкість метеопілі щодо РЛС або радіальну швидкість вітру.

Реальна метеопілі складається з безлічі гідрометеорних частинок з швидкостями, розподіленими випадковим чином в деяких межах $V_{r \min} \dots V_{r \max}$. Внаслідок цього відбитий сигнал можна представити таким чином:

$$S(t) = \sum_{i=1}^M a_i S_3 \cos \left(\omega t - \frac{2V_{ri}}{c} \omega t \right) = A'(t) \cos (\omega t - \Psi(t))$$

де a_i – відбивна здатність i -ї частинки; V_{ri} – радіальна швидкість i -ї частинки; $A'(t), \Psi(t)$ – випадкові функції.

Функція $A'(t)$ описує хаотичні зміни амплітуди відбитого сигналу, які виникають за рахунок хаотичного руху гідрометеорних частинок, функція $\Psi(t)$ є випадковою фазою флуктуації. Функцію $A'(t)$ називають огинаючою флуктуацією.

Зміни (флуктуації) $A'(t)$ на відміну від розглянутого раніше випадку характеризуватимуться тепер не одним значенням $\Omega = \omega(V_{r1} - V_{r2})/c$, а множиною таких значень, які створюють спектр доплерівських частот. Внаслідок випадкового руху відбивачів цей спектр буде випадковим.

Таким чином, спектр флуктуацій відбитого сигналу, від хмар і опадів, містить інформацію про спектр швидкостей руху гідрометеорних частинок цих атмосферних утворень. Спектр флуктуацій відбитого сигналу відповідає формою з спектром різниці радіальних швидкостей відбитих частинок.

Вивчення флуктуацій радіолокаційних сигналів, відбитих від хмар і опадів, у принципі дає можливість визначати деякі важливі характеристики, якими є флуктуації вектора вітру (турбулентність), швидкість і напрям вітру, гравітаційні швидкості частинок і їх розподіл за розмірами.

Вимірювання швидкості і напрямку вітру доплерівськими РЛС. Доплерівські РЛС, вимірюючи середнє значення доплерівської частоти відбитого сигналу, можуть зміряти середню радіальну швидкість вітру щодо РЛС. Для оперативної практики в метеорологічному відношенні необхідно знати вектор вітру, тобто величину швидкості вітру і її складові, а також напрям вітру. У загальному випадку вектор вітру має горизонтальну і вертикальну складові. Позначимо (рис. 3.4) через u , горизонтальну складову швидкості вітру, через v – вертикальну складову, W – напрям вітру, β – азимут осі діаграми спрямованості антени, δ – кут місця осі діаграми. Радіальна складова швидкості вітру V_r , яка зміряна РЛС, є проекція вектору швидкості вітру \vec{u} на вісь діаграми

направленості.

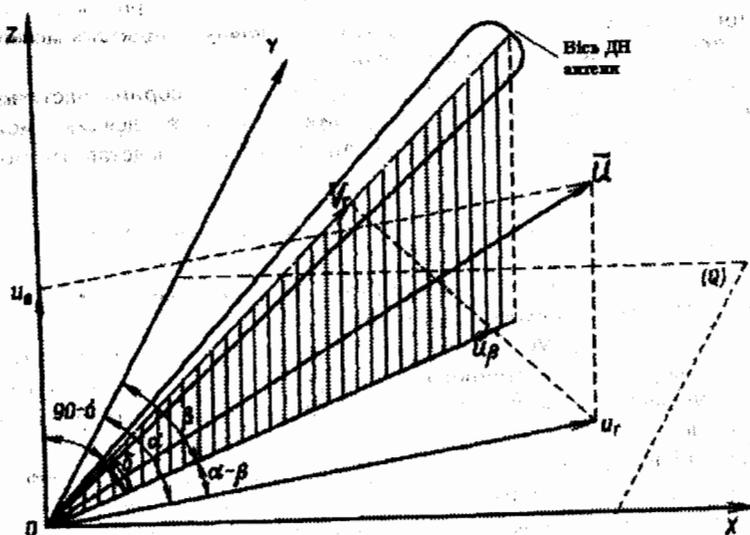


Рис. 3.4 – Визначення швидкості вітру за допомогою доплерівської РЛС

Оскільки проекція \vec{u} на вісь діаграми рівна сумі проекцій її складових u_r і u_b , то маємо

$$V_r = u_r \cos(\alpha - \beta) \cos \delta + u_b \sin \delta.$$

Для визначення вектора вітру \vec{u} необхідно визначити u_r , u_b , α .

V_r , β , δ вимірюються радіолокатором, u_r , u_b , α є невідомими. Для їх знаходження необхідна система трьох рівнянь. Таку систему можна отримати, використовуючи для визначення швидкості і напрямку вітру три доплерівські РЛС (рис. 3. 5).

Ця система має вигляд:

$$V_{r1} = u_r \cos(\alpha - \beta_1) \cos \delta_1 + u_b \sin \delta_1.$$

$$V_{r2} = u_r \cos(\alpha - \beta_2) \cos \delta_2 + u_b \sin \delta_2.$$

$$V_{r3} = u_r \cos(\alpha - \beta_3) \cos \delta_3 + u_b \sin \delta_3.$$

Розв'язуючи систему відносно α , u_r та u_b , визначимо вектор швидкості вітру.

Для реалізації цього методу вимірювання швидкості вітру потрібна чітка організація синхронних спостережень трьома РЛС і автоматична обробка результатів спостережень.

За допомогою однієї доплерівської РЛС можна визначити

горизонтальну складову швидкості вітру і його напрямок, якщо моніторити за опадами в районі розміщення РЛС.

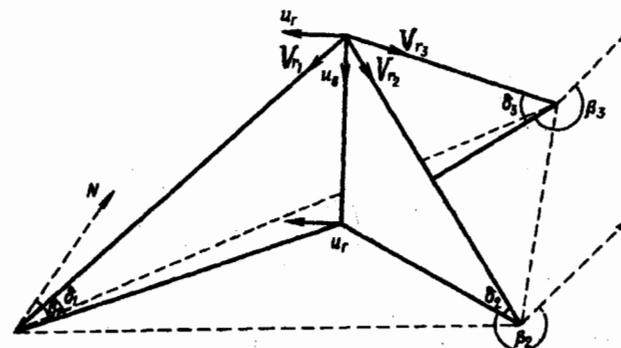


Рис. 3.5 – Застосування трьох доплерівських РЛС для визначення компонентів вітру

Дійсно, виставивши антенний промінь горизонтально ($\delta=0$), отримуємо

$$V_r = u_r \cos(\alpha - \beta).$$

Якщо вітер відсутній, то випадні краплі дощу не матимуть радіальної складової швидкості та доплерівська частота відбитих сигналів на виході РЛС буде рівна нулю. За наявності вітру у випадних крапель дощу з'явиться радіальна складова швидкості, що приведе до доплерівського зсуву частоти відбитого сигналу.

3.4 Зондування навколишнього середовища за допомогою радіолокаційних поляриметрів

Розпізнавання метеоцілей по поляризаційним характеристикам. Електромагнітні хвилі, які випромінені антенами метеорологічних РЛС, відносяться до класу плоских, повністю поляризованих електромагнітних хвиль. У такій хвилі вектори електричного (E) і магнітного (H) полів в кожен момент часу лежать в площині фронту хвилі (площині, перпендикулярної напрямку поширення) і ортогональні (перпендикулярні) один одному, а кінці їх описують в площині фронту хвилі однакові шкільні криві (рис. 3.6).

При розгляді поляризації хвилі звичайно обмежуються розглядом еліпсоїда тільки кінця вектору, маючи на увазі його жорсткий зв'язок з вектором \vec{H} .

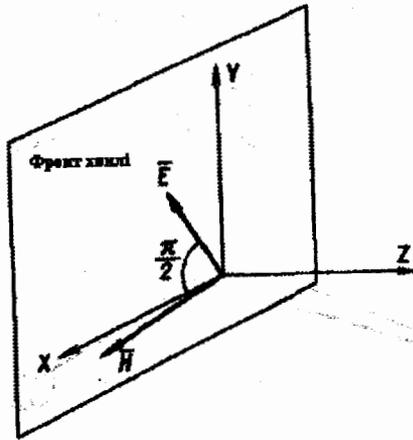


Рис. 3.6 – Орієнтація векторів E і H плоскої електромагнітної хвилі, що поширюється впродовж осі

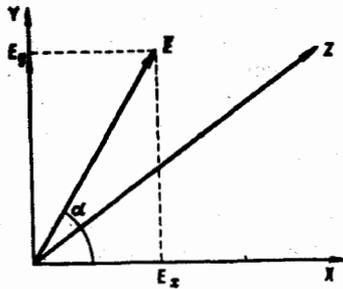


Рис. 3.7 – Складові вектора електричного поля в площині фронту хвилі

Поляризація довільної електромагнітної хвилі може бути задана значеннями трьох параметрів E_{xM} , E_{yM} і α , які визначають величини проєкції напруженості електричного поля \vec{E} (рис. 3.7) на відповідні осі:

$$E_x = E_{xM} \cos \omega t, \quad E_y = E_{yM} \cos(\omega t + \delta),$$

де: E_{xM} , E_{yM} – амплітуди складаючі вектора напруженості електричного поля на вісі X та Y ; ωt – фаза; t – час; δ – різниця фаз між складовими

випадками E_x та E_y .

Величини E_x і E_y мінюються від 0 до E_{xM} і E_{yM} відповідно. Тоді δ характеризує відрізок часу між моментами, коли кожна з величин E_x і E_y досягає максимуму або звертатися в нуль.

Залежно від розташування вектора \vec{E} в просторі розрізняють три види поляризації: лінійну або плоску, кругову і еліптичну.

Лінійна або плоска поляризація. Хай $E_{xM} = E_{yM}$ і $\delta = (n-1)\pi/2$, де n – ціле число. В цьому випадку матимемо постійний кут α між вектором \vec{E} і віссю X . Дійсно,

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{E_{xM}^2 \cos^2 \omega t + E_{yM}^2 \cos^2(\omega t + \pi)} = \\ &= \sqrt{(E_{xM}^2 + E_{yM}^2) \cos^2 \omega t} = E_M \cos \omega t \end{aligned}$$

Таким чином, вектор \vec{E} буде змінюватися у часі по гармонійному закону, маючи з віссю X постійний кут α , який можна визначити по співвідношенню

$$\operatorname{tg} \alpha = E_y/E_x = E_{yM}/E_{xM} = \operatorname{const}.$$

Такий вид поляризації називають плоскою поляризацією радіохвиль.

Кругова поляризація. Хай $E_{xM} = E_{yM}$ і $\delta = (2n-1)\pi/2$, де n – ціле число. В цьому випадку величини амплітуд E_x та E_y відповідно змінюються по гармонійному закону з різницею фаз $\delta = \pi/2$. Це означає, що E_x досягатиме максимуму, коли E_y звернеться в нуль, та навпаки. Кут нахилу вектора \vec{E} до осі X в цьому випадку визначатиметься виразом

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E_y}{E_x} = \frac{E_{yM} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)}{E_{xM} \cos \omega t} = \frac{\sin \omega t}{\cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t$$

Таким чином, вектор \vec{E} обератиметься з круговою частотою, а годограф його кінця представлятиме коло з радіусом $E_{xM} = E_{yM}$.

Такий вид поляризації називається круговою.

Еліптична поляризація. При $E_{xM} \neq E_{yM}$ та $\delta = (2n-1)\pi/2$ хвиля буде еліптично поляризованою, оскільки годограф кінця вектору \vec{E} матиме в площині фронту хвилі форму еліпса.

Більшість РЛС, використаних в метеорологічній службі, випромінює лінійно поляризовану хвилю.

Поляризація радіолокаційних сигналів, відбитих гідрометеорними частинками в загальному випадку відрізнятиметься від поляризації надійних сигналів. Таким чином, при відбитті радіолокаційних сигналів буде відбуватися деполіризація радіохвиль. Характер деполіризації визначається формою частинок і їх орієнтацією щодо вектору \vec{E}

зондового сигналу.

Хмари і опади в загальному випадку складаються з частинок довільної форми. Встановлено, що тільки краплі туманів і крапельно-рідинні хмари, які не дають опадів, приблизно можна вважати сферичними.

Причини, що призводять до зміни форми крапель опадів, обумовлені з одного боку, гравітаційним падінням, а з іншої – аеродинамічним опором повітряного середовища. В результаті цього краплі опадів виявляються сплюснутими у вертикальній площині і наближаються формою до двовісного еліпсоїда обертання. При розгляді фізичного механізму деполяризації радіохвиль при їх відбитті гідрометеорними частинками виникає необхідність апроксимації гідрометеорних частинок тілами, форма яких аналітично може бути описана. Двовісний еліпсоїд обертання найбільшою мірою відповідає формі реальних гідрометеорних частинок (рис.3.8).

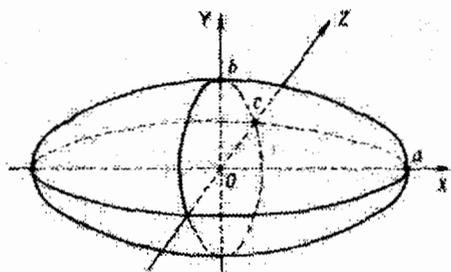


Рис. 3.8 – Двовісний еліпсоїд обертання

Фізичний механізм деполяризації радіохвиль при їх відбитті гідрометеорними частинками полягає в наступному. При опромінюванні частинки електромагнітною хвилею частинка за рахунок збудження в ній струмів зсуву і провідності стає джерелом вторинного випромінювання. Випромінювальні властивості частинки характеризуються випромінювальними властивостями диполів, орієнтованих вздовж відповідних осей еліпсоїда. Ці диполі мають дипольні моменти

$$P_i = E_i \frac{abc}{3} \frac{\epsilon - 1}{1 + (\epsilon - 1)n_i}$$

де: E_i – проекція вектора \vec{E} поля опромінюючої хвилі на відповідну вісь еліпсоїда ($i = a, b, c$); ϵ – діелектрична проникливість частинки; n_i – коефіцієнти форми, які мають наступні властивості: при будь-яких значеннях a, b, c $n_a + n_b + n_c = 1$, якщо $a > b > c$, то $n_a > n_b > n_c$.

Кожний з диполів при збудженні опромінюючою електромагнітною

хвилею починає випромінювати вторинне електромагнітне поле. Вектори \vec{E} цих полів орієнтовані вздовж осей диполів і мають величину, пропорційну дипольним моментам.

Результуючий вектор \vec{E} від відбитого сигналу, буде визначатися векторною сумою:

$$\vec{E}_{отр} = \vec{E}_{oa} + \vec{E}_{ob} + \vec{E}_{oc}$$

де $\vec{E}_{oa}, \vec{E}_{ob}, \vec{E}_{oc}$ – електричні вектори полів, що випромінюють диполями, орієнтованими вздовж осей a, b, c еліпсоїда.

У загальному випадку при опромінюванні еліпсоїдної частинки лінійно поляризованою хвилею відбита хвиля матиме як основну, так і неполяризовану складові.

Поява складової деполяризації у відбитому радіолокаційному сигналі служить основою для отримання інформації про мікрофізичну структуру метеоцифлей і їх розпізнавання.

Експериментальні дослідження виявили відмінність в поведінці коефіцієнта деполяризації для сигналів, відбитих від еліпсоїдних водяних ($\epsilon = 81$) і крижаних ($\epsilon = 3$) частинок (рис. 3.9).

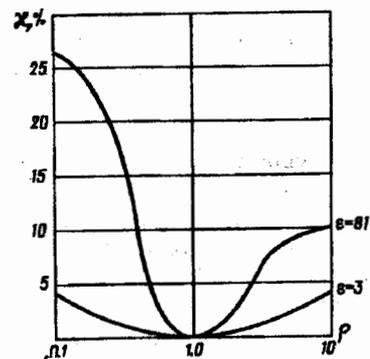


Рис. 3.9 – Залежність коефіцієнту деполяризації сигналів, відбитих від еліпсоїдних водяних ($\epsilon = 81$) і крижаних ($\epsilon = 3$) частинок, які довільно орієнтовані в просторі, від фактору форми P_f

Коефіцієнт деполяризації визначається співвідношенням

$$\alpha = \frac{P_{dep}}{P_{осн}} \cdot 100\%$$

де P_{dep} – потужність відбитого сигналу складової деполяризації; $P_{осн}$ – потужність відбитого сигналу основної поляризаційної складової.

Контрольні запитання

- 1 Які вимоги існують до РЛС метеорологічного призначення та з чим вони пов'язані?
- 2 Назвіть основні типи МРЛС та їхні особливості
- 3 Структурна схема МРЛ-5
- 4 Особливості МРЛ-5 як двоканальної радіостанції
- 5 Принцип роботи МРЛ-5
- 6 Зв'язок метеопараметрів із радіолокаційним відбиттям
- 7 Поясніть, які методи використовують для визначення водності та інтенсивності при радіолокаційних дослідженнях
- 8 Залежність параметрів зондування від довжини електромагнітної хвилі
- 9 Запишіть основне рівняння радіолокації для двох імпульсних об'єктів на двох довжинах хвиль
- 10 Послаблення радіохвиль на гідрометеоутворюваннях атмосфери
- 11 Поясніть метод вимірювання інтенсивності опадів, використовуючи коефіцієнти послаблення радіохвиль та відношення потужності відбитих сигналів
- 12 Поясніть метод вимірювання водності хмар, використовуючи коефіцієнти послаблення радіохвиль та відношення потужності відбитих сигналів
- 13 Наведіть переваги та недоліки розглянутого радіолокаційного метода
- 14 Охарактеризуйте доплерівський зсув частоти як джерело інформації про рух атмосферних частинок
- 15 Вимірювання швидкості та напрямку вітру доплерівськими РЛС
- 16 Обґрунтуйте необхідність використання трьох РЛС при вищевказаному вимірюванні
- 17 Які існують види поляризації електромагнітних хвиль?
- 18 Поясніть фізичний механізм деполіризації радіохвиль при їхньому відбитті гідрометеорними частинками

4 Радіотехнічне зондування гроз і верхньої атмосфери

4.1 Загальні відомості про грозові розряди

Однією з основних умов грозової діяльності є розвиток потужної вертикальної конвекції вологого повітря. Такі умови можуть виникати або при сильному нагріванні повітря у земної поверхні, або в результаті

внесення вгору теплої приземного повітря холодним повітрям, що циркулює знизу. У першому випадку виникають внутрішньомасові грози, а в другому – фронтальні.

Механізм грозової діяльності полягає в наступному. В процесі конвективного руху, викликаного підйомом теплої вологого повітря, утворюються конвективні ділянки, в кожній з яких виникає висхідний рух в центрі і низхідний по периферії. Горизонтальні розміри таких ділянок можуть складати 2–8 км, а їх число сягати в окремих грозових хмарах тисяч. Простір між конвективними ділянками, сорозмірний з розмірами ділянки, займають безвихрові зони. Кожна конвективна ділянка проходить стадії зародження, зрілості і згасання.

В процесі конвективного підйому повітря відбувається інтенсивний розділ окремих хмарних частинок і розділення зарядів, чому сприяє дія на окремі частинки прискорення вільного падіння. Відповідно до схематичної моделі грозової хмари (рис. 4.1) його верхня частина заряджена позитивно, а нижня – негативно.

В результаті розділення зарядів усередині хмари і в оточуючому її просторі створюються сильні електричні поля, з-за яких між окремими частинками хмари або між хмарою і землею можуть виникати електричні розряди – блискавки.

Грозовий розряд представляє складний електродинамічний процес, який складається з декількох специфічних стадій, з загальною тривалістю близько 0,5–1,5 с. Процес електричного розряду (блискавки) супроводжується імпульсом електромагнітного випромінювання, званім атмосферіком, який може розповсюджуватися на значну відстань.

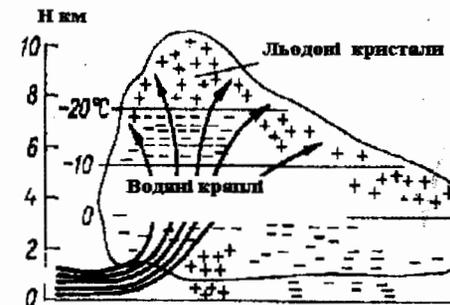


Рис. 4.1 – Електрична структура грозової хмари

Однією з основних характеристик атмосферіків є їх частотний спектр, який є складним. Для ілюстрації характеру спектру електромагнітного

випромінювання грозових розрядів на рис. 4.2 показана зміна відносної спектральної щільності, яка може бути використана для вибору діапазону роботи приймального пристрою пеленгатора-далекоміру гроз.

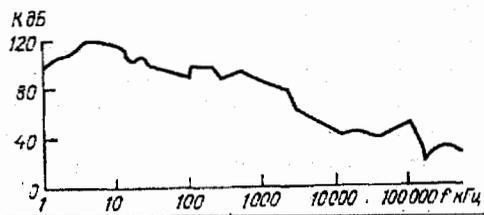


Рис. 4.2 – Спектральна щільність атмосфериків, приведена до смуги частот 1 кГц і відстані 10 км

На відстанях більше 25–30 км атмосферика можна розглядати як випромінювача електричного диполя. Користуючись такою моделлю випромінювача, трасу розповсюдження атмосфериків можна умовно розбити на три зони: ближню (від 0 до 15 км), середню (від 15 до 300 км) і дальню (понад 300 км). У ближній зоні при оцінці розповсюдження атмосфериків землю можна вважати плоскою.

На характер розповсюдження атмосфериків на відстані 150 кілометрів істотний вплив робить провідність підстильної поверхні і кривизна Землі. При розрахунку напруженості поля в дальній зоні можна враховувати тільки перше відбиття від іоносфери.

У загальному випадку характер зміни напруженості атмосферика залежить від частоти (рис. 4.3).

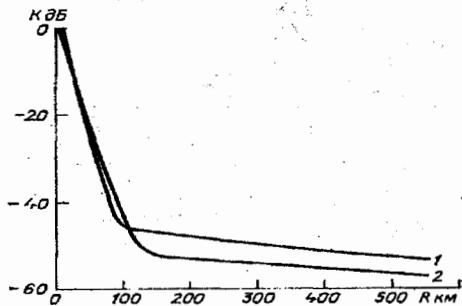


Рис. 4.3 – Зміна з відстанню низькочастотної компоненти атмосферика (700 Гц): 1 – день, 2 – ніч

4.2 Вимірювання дальності до гроз радіотехнічними методами

Принцип вимірювання дальності грозових розрядів заснований на зміні параметрів атмосфериків з відстанню. Залежно від вживаних для дальнометрії параметрів розрізняють:

- амплітудний метод дальнометрії,
- Е-Н метод,
- амплітудно-спектральний та інші.

Амплітудний метод вимірювання відстаней до центру грози полягає у використанні залежності амплітуди максимальної напівхвилі атмосферика від відстані. Максимальною напівхвилею атмосферика, розповсюдженого в широкій смузі частот, для відстаней до 400 км є перша напівхвиля, ще не зачеплена впливом іоносферних відбивань.

Закон зміни амплітуди першої напівхвилі від відстані апроксимується монотонною функцією $1/R^k$ (коефіцієнт k залежить від типу атмосферика і висхідності підстильної поверхні).

Експериментально встановлено, що для цілей амплітудної дальнометрії доцільно використовувати частоти від 50 до 100 кГц. Це обумовлено тим, що для відстаней до 300 км на цих частотах ще не відбуваються значні коливальні зміни амплітуди за рахунок іоносферних відбивань, і на цих частотах має місце яскраво виражена залежність від відстані.

При побудові амплітудних далекомірів на принципі прийому певних спектральних складових слід мати на увазі, що різні спектральні складові при поширенні ослабляються по-різному. Так, спектральні складові в діапазоні 30–300 Гц послаблюються обернено пропорційно до куба відстані в діапазоні дальностей від 50 до 100 км, а складові в діапазоні 0,5–1,0 МГц мають експоненціальну залежність від відстані.

Е-Н-метод. Суть Е-Н-методу дальнометрії атмосфериків полягає у використанні різної залежності від дальності інтенсивностей електричної (Е) і магнітної (Н) складових поля. При реалізації цього методу можливі різні модифікації:

- 1) амплітудна,
- 2) фазова,
- 3) імпульсна.

При амплітудній модифікації використовується залежність від відстані відношення

$$V = \frac{|H_{\phi}|}{|E_z|}$$

характер зміни якого при різних частотах хвилі, що приймається, визначений на рис. 4.4.

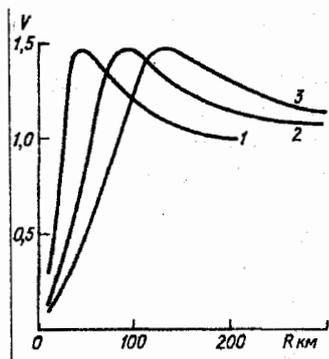


Рис. 4.4 – Залежність відношення модулів горизонтальної магнітної і вертикальної електричної складових атмосфериків від відстані (1 – частота 1500 Гц, 2 – 600 Гц, 3 – 400 Гц)

При фазовій модифікації Е-Н-методу використовується залежність від відстані різниці фаз між горизонтальною магнітною (H_f) і вертикальною електричною (E_z) складовими (рис. 4.5):

$$\Delta\Phi_{HE} = -\arctg \frac{1}{(kR)^3},$$

де: $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число.

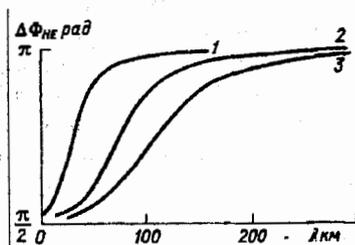


Рис. 4.5 – Залежність різниці фаз горизонтальної магнітної і вертикальної електричної складових атмосфериків від відстані: 1 – частота 1500 Гц, 2 – 600 Гц, 3 – 400 Гц

Імпульсна модифікація Е-Н-методу заснована на одночасному прийомі і відповідній обробці електричної і магнітної складових. Цей метод застосовний до відстаней 100–120 км. При прийомі електричної і магнітної складових з великих відстаней відмінності між ними пропадають

і виділення відповідної різниці сигналів на фоні перешкод виявляється практично неможливим.

Амплітудно-спектральний метод далекометрії гроз заснований на використанні різної залежності загасання спектральних складових атмосфериків від відстані при поширенні в хвильоводному каналі Земля-іоносфера. Спочатку амплітудно-спектральний метод використовувався для далекометрії гроз на відстанях понад 1000 км. В даний час при роботі в діапазоні наднизьких частот область використання методу доведена до 200 км.

Пеленгатори і пеленгатори - далекоміри гроз. Пеленгатори – спеціальний засіб для визначення місцеположення гроз. Вони дозволяють практично миттєво визначати напрям на джерела грозових розрядів. Всі відомі в даний час пеленгатори гроз є моноімпульсними двоканальними пеленгаторами з двома рамковими антенами, працюючими в діапазоні низьких частот. Рамкові антени, що мають діаграми направленості у вигляді вісімок, орієнтовані перпендикулярно один одному і сполучені з відповідними радіоприймачів. При прийомі електромагнітного випромінювання грозового розряду у взаємно перпендикулярних антенах виникають затухаючі коливання, пропорційні по амплітуді синусу і косинусу кута приходу хвилі. Після посилення і перетворення в каналах приймача сигнали подаються на відхильні пластини електронно-оптичної трубки індикатора. Електронний промінь трубки під дією відхильючих напруток відхиляється на певний кут, відповідний куту приходу хвилі.

Для усунення неоднозначності, обумовленої симетричним характером діаграми направленості рамкової антени, використовують додаткову ненаправлену антену, сигнал якої після відповідного перетворення і посилення подається на управляючий електрод електронно-оптичної трубки, внаслідок чого половина лінії розгортки на екрані змінюється. Сигнали від направленої і ненаправленої антен подаються на індикаторний пристрій в різній полярності: сигнали, відповідні правій напівплощині, в одній полярності, а лівої – в іншій. В результаті виходить, що в одній з напівплощин сигнали направленої і ненаправленої антен віднімаються, а в іншій віднімаються. В результаті такого складання і утворюється сумарна діаграма спрямованості у вигляді кардіоїди (рис. 4.6).

В даний час відомі два різновиди грозопеленгаторів, які реалізують описаний вище принцип.

Пеленгатор першого різновиду (рис. 4.7) містить дві направлені антени (1 і 3), які орієнтовані по напрямках північ-південь і захід-схід і мають в горизонтальній площині діаграми направленості $\sin \varphi$ і $\cos \varphi$ (φ – кут, відлічений від напрямку на північ). Антени навантажені на шунтосмугові фільтри 4 і 6, які налаштовані на робочу частоту

пеленгатора. Ненаправлена антена 2 використовується для усунення неоднозначності визначення напрямку. Вона також навантажена на аналогічний вузькосмуговий фільтр 5, налаштований на ту ж частоту, що і фільтри основних каналів.

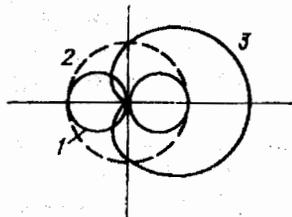


Рис. 4.6 – Діаграми направленості

1 – рамкової антени, 2 – ненаправленої антени, 3 – їх комбінації

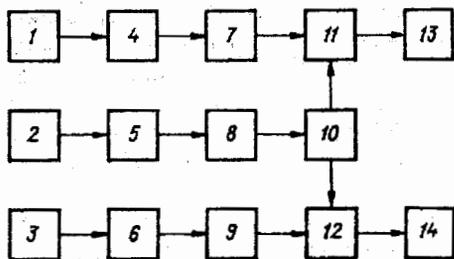


Рис. 4.7 – Структурна схема пеленгатора першого різновиду

Під дією атмосфери на виходах відповідних фільтрів з'являються сигнали:

$U_1(t) = Z_1(t) \sin \varphi \sin \omega t$, $U_2(t) = Z_2(t) \cos \varphi \sin \omega t$, $U_3(t) = Z_3(t) \sin(\omega t + \Phi_3 + 90^\circ)$, де: $Z_1(t)$, $Z_2(t)$ і $Z_3(t)$ – огибаючі відповідних синусоїдальних сигналів; φ – кут приходу хвилі; Φ_3 – змінення фази хвилі в приймальному тракті ненаправленої антени.

Після виходу з вузькосмугових фільтрів сигнали посилюються підсилювачами 7, 8, 9 і через підсилювач-обмежувач 10 подаються на синхронні детектори 11, 12. При цьому сигнал ненаправленої антени використовується як опорна напруга. Перед підсилювачем сигналів ненаправленої антени включається фазообертач, який забезпечує різницю фаз вхідних сигналів направлених і ненаправлених антен на 90° . На виходах синхронних детекторів матимуть місце напруги:

$$U_{1\pm} = k_1 Z_1(t) \sin \varphi \cos(\Phi_3 - \Phi_1), \quad U_{2\pm} = k_2 Z_2(t) \cos \varphi \cos(\Phi_3 - \Phi_2),$$

де k_1, k_2 – коефіцієнти посилення першого і другого підсилювальних трактів; Φ_1, Φ_2 – набіги фаз при посиленні сигналів.

Якщо $k_1 = k_2$, $Z_1(t) = Z_2(t)$ і $\Phi_1 = \Phi_2$, то

$$\varphi = \arctg \frac{U_{1\pm}}{U_{2\pm}}$$

З виходу синхронних детекторів огибаючі напруги за допомогою фільтрування 13 і 14 перетворюються в прямокутні імпульси тривалістю декілька мілісекунд, що подаються на відхильні пластини трубки.

Пеленгатор другого різновиду (рис. 4.8) також містить три канали: два канали відповідають ортогонально орієнтованим одна до одної рамковим антенам, третій – ненаправленої антени. Сигнали, що прийняті направленими антенами 1 і 2 і пройшли вузькосмугові фільтри 4 і 5, підсумовуються в пристрої 8 з додатковим зсувом фаз в 9, що забезпечується фазообертачем 7. При однакових огибаючих $Z_1(t)$ і $Z_2(t)$ і однакових амплітудних і фазових характеристиках приймачів сумарний сигнал на виході пристрою 8 матиме вигляд:

$$U = Z(t) \sin(\omega t + \varphi),$$

де φ – кут приходу хвилі, що вимірюється від напрямку на північ.

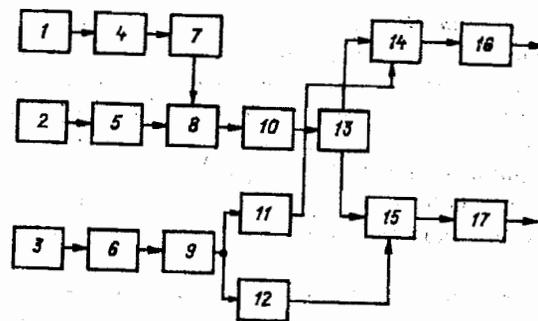


Рис. 4.8 – Структурна схема пеленгатора другого різновиду

Знята з підсумовуючого пристрою 8 напруга за допомогою фільтрування 10 і фільтру 13 перетворюється в сигнал з прямокутною огибаючою

$$U = A(t) \sin(\omega t + \varphi),$$

де $A(t)$ – огибаюча синусоїдальних сигналів.

У разі не ідентичності каналів замість цього виразу матиме місце співвідношення:

$$U = A(t) \sin(\omega t + \varphi + \Delta\varphi),$$

де: $\Delta\varphi$ – фазовий набіг, обумовлений не ідентичністю фазових характеристик приймальних каналів.

З виходу фільтру 13 сигнал поступає на два фазових детектори (14, 15), на які як опорна напруга подаються сигнали ненаправленої антени 3, заздалегідь зсунуті по фазі на 90° за допомогою фазообертачів 11, 12. Фільтр 6 і підсилювач 9 мають таке ж призначення, як і в каналах направлених антен. На виходах фазових детекторів отримуємо напруги:

$$U_{1\pm} = k_1 A'_1(t) \sin(\varphi + \Delta\varphi_1 + \Delta\Phi_{13}), \quad U_{2\pm} = k_2 A'_2(t) \cos(\varphi + \Delta\varphi_2 + \Delta\Phi_{23}),$$

де: k_1 і k_2 – коефіцієнти передачі першого і другого каналів; $\Delta\Phi_{13}$ і $\Delta\Phi_{23}$ – різниця фаз між сигналами у відповідних антенах і ненаправленої антени.

З виходу фазових детекторів сигнали поступають на відповідні формувачі 16, 17, де перетворюються в прямокутні імпульси, які і використовуються для вимірювання кута приходу хвилі. З останніх співвідношень витікає, що за умови $k_1 = k_2$, $A'_1(t) = A'_2(t)$, $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2$,

$$\Delta\Phi_{13} = \Delta\Phi_{23} \text{ має місце співвідношення } \varphi = \arctg \frac{U_{1\pm}}{U_{2\pm}}.$$

Пеленгатор-далекомір гроз. Розглянуті далекоміри дозволяють визначати дальність від джерел грозових розрядів, а пеленгатори – напрям на них. Ні ті, ні інші не дозволяють визначати місцеположення джерела розрядів. Пеленгатори-далекоміри є пристроями, що складаються з сукупності далекоміра і пеленгатора. В поточний час пеленгатори-далекоміри використовуються спільно з радіолокаторами типу МРЛ.

Для спільної роботи з імпульсними метеорологічними РЛС розроблений радіопеленгатор гроз ПАГ-1 з обмежувачем дальності дії (рис. 4.9).

Пеленгатор має два канали: азимутний та обмеження дальності дії. Азимутний канал призначений для однозначного визначення напрямку на джерело грозових розрядів, а канал обмеження дальності дії – для прийому випромінювання грозових розрядів, що виникають за межами дальності виявлення метеорологічної РЛС, з якою пеленгатор працює.

Для визначення напрямку на джерело грозових розрядів служать дві взаємно перпендикулярні рамкові антени (1, 7). Сигнали, прийняті рамковими антенами, посилюються підсилювачами 2, 8 і поступають на синхронні детектори 3, 9, призначені для усунення неоднозначності визначення напрямку приходу хвилі. Як опорна напруга для синхронних

детекторів використовується сигнал ненаправленої антени 11, сформований схемою 12. З метою збільшення динамічного діапазону підсилювачів 2, 8 в їх схеми введено швидкодійне („миттєве“) автоматичне регулювання посилення (МАРП) за допомогою блоку 5. Принцип його роботи полягає у тому, що при перевищенні сигналом певного рівня відбувається одночасна і однакова зміна коефіцієнта посилення в обох підсилювальних трактах.

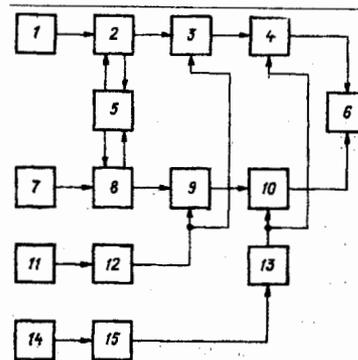


Рис. 4.9 – Структурна схема грозопеленгатора ПАГ-1

Сигнали дзвіноподібної форми, що знімаються з виходів фазових детекторів за допомогою формувачів 4, 10, переробляються в імпульси прямокутної форми. Їх величини пропорційні косинусу і синусу кута між напрямом приходу хвилі і напрямом на північ. З цих напруг в індикаторі 6 формуються напруги розгортки, що забезпечують на екрані електронно-променевої трубки певні радіальні лінії. Вони розповсюджуються від центру до краю екрану по напрямку на джерело грозових розрядів.

Внаслідок використання трубки з тривалим післясвітом екрану забезпечується збереження інформації пеленгації на її екрані протягом певного часу (до 30 хвилин). Амплітудний канал працює на частоті 7 кГц при швидкості пропускання 200 Гц. Пеленгатор ПАГ-1 забезпечує ймовірність виявлення гроз на відстанях до 300 км не менше 0,90, а ймовірність інформації дальніх гроз (на відстані $R > 400$ км) не більш 0,05. Визначення напрямку на грозу здійснюється з середньою квадратичною помилкою по азимуту не більш 3° і максимальною 7° . Пеленгатор має виносний індикатор з кабельною лінією до 1 км та вивід пеленгу на екран метеорологічного радіолокатора.

4.3 Радіозондування іоносфери

Вивчення потенціалів постійного і змінного магнітних полів Землі дозволяє стверджувати, що частина цих полів створюється джерелами, що знаходяться поза Землею. Такими джерелами можуть бути лише електричні струми, які протікають в атмосфері або за її межами.

Припущення про наявність провідної області у верхній атмосфері було виказане К. Гаусом у 1839 році. А. Кеннеді і О. Хевісайд майже одночасно виказали припущення, що розповсюдження радіохвиль за межі прямої видимості обумовлено їх відбиттям від електропровідного шару.

Іоносфера. Електропровідність іоносфери залежить від таких її параметрів, як частота зіткнень частинок і їх концентрація. У свою чергу розподіл провідності в іоносфері багато в чому визначає конфігурацію виникаючих тут струмів, що є за сучасними уявленнями джерелом більшості геомагнітних збурень. Таким чином, відомі до теперішнього часу факти свідчать про тісний зв'язок між геомагнітними збуреннями і фізичними характеристиками іоносфери. Під впливом іонізуючих випромінювань у верхній атмосфері відбуваються складні фізико-хімічні процеси: іонізація, іонно-молекулярні реакції і рекомбінація.

Внаслідок численних експериментальних досліджень було встановлено, що концентрація іонів і електронів в іоносфері розподілена по висоті нерівномірно: є області (або шари), де вона досягає максимальної величини. Реальна іоносфера складається з декількох таких шарів, між якими може не бути різких меж. Їх положення і інтенсивність регулярно змінюються протягом дня, сезону і 11-річного сонячного циклу. Самий верхній шар носить назву шару F і відрізняється максимальною концентрацією електронів. Вночі він підіймається до 300–400 км, а вдень роздвоюється на шари F1 і F2 з максимальними величинами електронної концентрації на висотах відповідно 160–200 і 220–320 км. На висотах 90–150 км виділяють шар E, а нижчі 90 км – шар D. Вночі на висотах, відповідних шару E, може виникати так званий спорадичний шар Es. Типовий вертикальний розподіл електронної концентрації в іоносфері показаний на рис. 4.10.

Зондування іоносфери. В даний час існує цілий ряд методів дослідження фізичних характеристик іоносферної плазми в різних областях іоносфери.

Найчисленнішою є група методів, заснованих на прийомі і вимірюванні радіохвиль, які посилюються з поверхні Землі, а також з супутників або ракет. Найстарішим в цій групі є метод іоносферного радіозондування, який здійснюється шляхом послідовної послідовної поступово змінюючої частотою і вимірювання часу їх пробігу до відбиваючого шару і назад. Основні уявлення про структуру і параметри

іоносфери від нижньої її межі до головного максимуму і розподілу електронної концентрації були отримані саме цим методом. Інтерпретація вимірних величин в радіотехнічних методах при дослідженні іоносфери ґрунтується на теорії поширення електромагнітних хвиль через іонізовану середовище за наявності магнітного поля Землі.

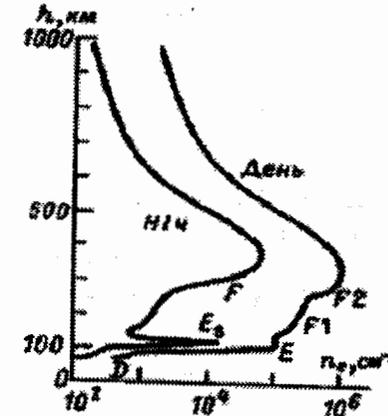


Рис. 4.10 – Типовий вертикальний розподіл електронної концентрації в іоносфері

Заряджена частинка (зокрема, електрон) в електричному полі радіохвилі, що змінюється по гармонійному закону $E = E_0 \exp(j\omega t)$, буде рухатися з прискоренням, яке пропорційне полю:

$$m_e (d^2 r_k / dt^2) = e E_0 \exp(j\omega t) = e E,$$

де r_k – радіус-вектор будь-якого електрону; m_e – маса електрону.

Густина повного струму, викликаного рухом зарядів, буде визначувати:

$$j = e \sum_k (dr_k / dt - dr_k^{(i)} / dt),$$

де dr_k / dt та $dr_k^{(i)} / dt$ – швидкість електрону та іону відповідно.

З урахуванням гармонічної залежності всіх змінних від часу і того,

що $E = \epsilon E$, а зв'язок між струмом провідності та електричним полем має вигляд $j = \sigma E$, після перетворень отримаємо наступний вираз для відносної діелектричної проникливості речовини:

$$\epsilon = 1 - \frac{4\pi e^2}{\omega^2} \left(\frac{n_e}{m_e} + \sum_l \frac{n_l}{m_l} \right),$$

де під n_l розуміється концентрація іонів любого знаку з масою m_l . Вплив

більш тяжких по зрівнянню з електронами іонів звичайно дуже мала, тому, враховуючи їх нерушливими, можна записати:

$$\varepsilon = 1 - 4\pi [n_e e^2 / (m_e \omega^2)],$$

тут n_e – концентрація електронів з вагою m_e , та зарядом e , ω – колова частота електромагнітної хвилі.

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у середовищі виражається за формулою $v = c/\sqrt{\varepsilon}$. Тому, замінюючи ε його виразом, отримаємо

$$v = \frac{c}{\sqrt{1 - 4\pi \left(\frac{n_e e^2}{m_e \omega^2} \right)}}$$

Таким чином, швидкість поширення радіохвиль в іоносфері виявляється залежною від концентрації електронів і кругової частоти електромагнітної хвилі. Якщо радіохвиля не монохроматична, то остання формула показує швидкість окремої компоненти фази і називається тому фазовою швидкістю.

Отже, частота радіохвилі, при якій відбувається відбиття

$$f = \sqrt{n_e e^2 / (\pi m_e)}$$

Ця умова зв'язує частоту відбитої хвилі з концентрацією заряджених часток на висоті h , де відбулося відбиття. Якщо провідність іоносфери створюється електронами, маса яких $m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г, концентрація заряджених часток може бути записана у вигляді $n_e = 1,24 \cdot 10^{-8} f^2$.

На принципі радіозондування була створена іоносферна станція, що дозволяє фіксувати час пробігу радіохвилі до шару, що відбиває, і назад.

На екрані осцилографа при цьому виникає діаграма, на якій променем, що рухається знизу нагору, відзначається час, що пройшов від моменту випромінювання до моменту прийому радіохвилі. Отриману картину можна розглядати як діаграму, що зображує час пробігу відбитого променя до об'єкту в залежності від частоти. Цю діаграму називають іонограмою. Вісь ординат на діаграмі градується в одиницях довжини хвилі, а висоти, які отримані по такій діаграмі, називають діючими висотами. Для зручності розшифровки іонограм одночасно з розгорненням часу і частоти виробляються мітки часу або дальності і частоти. Найчастіше ці мітки ставляться через 1/1500 секунди або 100 км і через 1 МГц.

Діюча висота, яка знімається з іонограми, знаходиться множенням часу пробігу на швидкість світла. У дійсності ж радіосигнал поширюється з швидкістю, яка називається груповою і відрізняється від швидкості світла. Групова швидкість являє собою швидкість поширення інтерференційного максимуму.

Групова швидкість хвилі в іонізованому газі виявляється менше

швидкості світла і у момент відбиття падає до нуля. Обчислена висота, що для іоносферної станції, отже, завжди менше справжньої. Якщо відомо характер зміни n_e з висотою, то може бути знайдений зв'язок обчисленої висоти зі справжньою.

На рис. 4.11 наведена іонограма. Нижня жирна пряма на цій іонограмі слід, прокреслений прямим сигналом. Криві над віссю абсцис є результатом відбиття від верхніх шарів іоносфери. Крива, що має ординату 100 км і абсциси в межах від 1 до 5 МГц, є результатом відбиття від шару на висоті близько 100 км. Крива, їй паралельна, з ординатою, у два рази більше, являє собою результат подвійного відбиття від того ж самого шару.

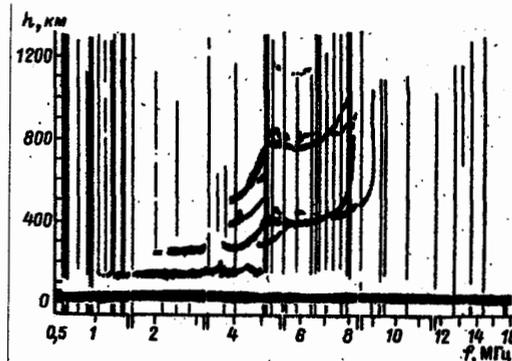


Рис. 4.11 – Приклад іонограми

Криві з абсцисами від 3,5 до 9 МГц належать відбиванім шарам з діючими висотами 230 і 370 км. Слід, що перебуває над ними на подвійній висоті, знову являє собою результат дворазового відбиття.

Шар, що перебуває на висоті 100 км і, що відбиває в даному випадку радіохвилі з частотами від 1 до 3,5 МГц, називається E-шаром іоносфери. Судячи з виду іонограми, висота цього шару залишається постійною для всіх частот в інтервалі від 1 до 3,5 МГц, і, отже, концентрація електронів зростає дуже швидко, досягаючи $1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Кожний слід на іонограмі від цих шарів з боку високих частот обмежений областю різкого зростання діючих висот, і відповідна йому частота називається критичною частотою даного шару. Ділянки пологого підйому кривій на діаграмі відповідає ріст концентрації n_e з ростом висоти. Критичній частоті відповідає максимальна для даного шару концентрація.

Уоблизу максимуму концентрація залишається майже постійною в деякому інтервалі висот. Частотам 5–8 МГц, відзначеним як критичні для шарів F1 і F2, відповідають концентрації $3 \cdot 10^5$ і $8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$.

На ділянках крутого підйому висот шарів F1 і F2 (з боку більшої частот) сліди на екрані осцилографа роздвоюються. Це явище, аналогічне подвійній променезаломленості в кристалах, викликано дією іоносфери постійного магнітного поля Землі.

В плазмі зміщення електронів відносно рівноважного стану зворотне повернення їх до рівноваги буде супроводжуватися коливаннями з частотою ω_0 . Тому для електронів плазми вводять величину ω_0 , як звичайно називається плазмовою частотою. Величина $\omega_H = eB/(mc)$ називається циклотронною частотою та являє собою кутову швидкість руху електрону навколо силових ліній магнітного поля.

Внаслідок наявності поперечної і повздовжньої по відношенню до напрямку поширення радіохвилі складових магнітного поля виникають відповідні циклотронні частоти оберту електрону.

Радіохвиля, що відбита від шару, де виконана перша умова називається звичайною хвилею; її частота пов'язана з концентрацією зарядів і має вигляд

$$\omega_1 = \omega_H / 2 + \sqrt{\omega_H^2 / 4 + \omega_{0e}^2},$$

$$\omega_2 = -\omega_H / 2 + \sqrt{\omega_H^2 / 4 + \omega_{0e}^2}.$$

Хвиля, що йде вгору, з частотою ω , відіб'ється від області концентрації заряджених часток в яких задовольняє одній з трьох умов $\omega = \omega_0$, $\omega = \omega_1$, $\omega = \omega_2$.

Друга умова вимагає менших величин ω_0 і концентрацій зарядів може бути виконана раніше першої. Відповідна йому хвиля відіб'ється від шару з меншою висотою. Така хвиля отримала назву незвичайної.

Третій умові відповідає так звана z-компонента, яка відбивається від шару, розташованого вище, ніж область відбиття звичайної хвилі. Ця хвиля звичайно не спостерігається. Спостерігатися z-компонента може лише у високих широтах.

Іоносферне зондування з поверхні Землі дає уявлення про характер зміни концентрації електронів з висотою на висхідних гілках кривої ділянки, де концентрація росте з висотою.

На різних висотах можна скласти повне уявлення про форму променя тобто про показник заломлення.

Може бути застосований швидший спосіб аналізу, якщо на ракеті або супутнику працюють два передавачі, живлені від одного генератора таким чином, що частоти цих передавачів ω_1 і ω_2 кратні між собою або ж кратні деякій третій частоті і зсув фаз між ними залишається постійним.

Час, витрачений на пробіг обох хвиль з висоти h до Землі, рівний:

$$t_1 = \int_0^h \frac{dh}{v_1}, \quad t_2 = \int_0^h \frac{dh}{v_2}.$$

Замінюючи v_1 і v_2 їх виразами при $\omega = \omega_1$ і $\omega = \omega_2$ знайдемо, що різниця часу пробігу визначається з співвідношеннями

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{1}{c} \int_0^h \left(\sqrt{1 - \frac{4\pi n_e e^2}{m_e \omega_2^2}} - \sqrt{1 - \frac{4\pi n_e e^2}{m_e \omega_1^2}} \right) dh,$$

якщо випромінювані частоти набагато більше плазмової частоти ω_0 , то

$$\Delta t = \left(\frac{2\pi e^2}{cm_e} \right) \left(\frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_2^2} \right) \int_0^h n_e dh.$$

Обробивши прийняті хвилі, можна по характеру биття судити про зсув фаз між ними і визначити різницю часу пробігу Δt . Знаючи ж Δt як функцію висоти ракети, можна знайти повний профіль $n_e(h)$.

Дана задача може бути вирішена і ще одним способом: при проходженні радіохвилі крізь іонізований газ відбувається поворот площини поляризації. При цьому величина повороту на одиницю шляху залежить від концентрації електронів, від компоненти напруженості поля радіохвилі променя і від частоти. Спостерігаючи поворот площини поляризації як функцію висоти, можна знайти також розподіл концентрації електронів.

Дослідження нижньої іоносфери є складнішою задачею в порівнянні з дослідженням областей E і F. Більшість радіометодів дослідження області I іоносфери заснована на тому факті, що вона поглинає радіохвилі через зіткнення електронів з молекулами газу.

Найпростішим з них є метод, заснований на вимірюванні поглинання космічного радіовипромінювання. Рівень космічного радіовипромінювання, що приходить на Землю, змінюється залежно від напрямку в просторі. Щоб визначити величину поглинання в іоносфері, необхідно порівняти рівень космічного радіовипромінювання в даний момент часу з його величиною в такий же зоряний час, але за відсутності іоносфери.

Існують методи розрахунку зміни концентрації електронів з висотою наслідками вимірювання поглинання космічного радіовипромінювання на декількох частотах.

Слід зазначити також метод часткових відбиттів, заснований на вимірюванні слабких відбиттів радіосигналів від невеликих висхідностей в іоносфері.

Контрольні запитання

- 1 Умови, що необхідні для виникнення грозової діяльності
- 2 Що таке конвективна ячейка?
- 3 Відобразіть електричну структуру грозової хмари
- 4 Як відбувається поширення атмосфериків над землею поверхнею?
- 5 Які існують методи вимірювання дальності грозових розрядів?
- 6 Охарактеризуйте амплітудний метод вимірювання відстаней до грозових вогнищ
- 7 В чому полягає Е-Н метод далекометрії атмосфериків та його модифікації?
- 8 Поясніть принцип дії пеленгатора гроз
- 9 Відобразіть структурну схему пеленгатора першого виду та особливості його роботи
- 10 Відобразіть структурну схему пеленгатора другого виду та особливості його роботи
- 11 Пеленгатори - далекоміри гроз, їхня структурна схема
- 12 Фізичні властивості іоносфери та її склад
- 13 В чому полягає метод іоносферного зондування при далекометрії?
- 14 Іонограми як засіб вивчення іоносфери та спостереження за нею

5 Лазерне зондування навколишнього середовища

5.1 Принцип дії і конструкція лазерів і лідарів

Лазер є оптичним квантовим генератором (ОКГ), випромінювання якого відрізняється високою когерентністю і монохроматичністю, дуже малим геометричним розсіянням оптичного пучка, а при необхідності надзвичайно високою спектральною щільністю випромінювання. Лазером є основою оптичного локалятора, скорочено який називають лідаром (аналогія з радаром – скорочена назва радіолокатора).

Залежно від того, що є активним середовищем ОКГ, розрізняють лазери:

- газів (гелій-неоновий, аргоновий і т.п.);
- твердотільні (рубіновий, скляний або сапфіровий);
- рідинні;
- напівпровідникові.

Лазери також розрізняються за способом збудження активної речовини: за рахунок оптичного випромінювання, збудження за рахунок потоку електронів, за рахунок сонячної енергії, хімічної енергії,

збудженням за допомогою ядерного вибуху. Крім того, лазери відрізняються по характеру випромінювання: безперервні, імпульсні і змінним режимом роботи (наприклад, напівпровідникові). Лазери, що використовуються при дистанційному зондуванні навколишнього середовища, в основному імпульсні. Потужність випромінювання таких лазерів лежить в межах від 10^{-4} до 10^{10} і більш Вт. При щільності потоку потужністю 10^5 Вт/см² починається плавлення металу, а при щільності потоку 10^9 Вт/см² лазерне випромінювання іонізує парову речовину, перетворюючи її на плазму.

На рис.5.1 показані діапазони довжин хвиль, в яких працюють сучасні лазери.

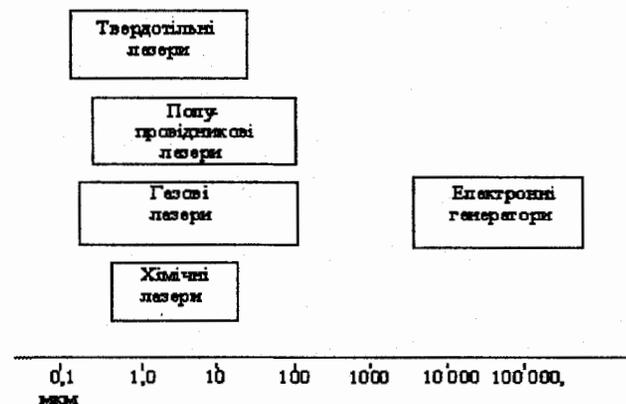


Рис. 5.1 – Діапазон довжин хвиль, в яких працюють сучасні лазери

Для того, щоб примусити лазер працювати як вимірювальний (емісійний) пристрій, необхідно мати відповідні первинні перетворювачі (приймачі) випромінювання, а також пристрій управління випромінюванням лазера: модулятори і розщеплювачі сигналів.

Лазерний імпульс заданої форми може формуватися або в самому ОКГ або в зовнішньому перетворювачі після виходу оптичного сигналу з ОКГ.

Спектр випромінювання речовини, як відомо, визначається взаємним розташуванням енергетичних рівнів і переходом електронів, що супроводжується випромінюванням. Випромінююче тіло можна представити як систему незалежних осциляторів. Якщо не вживати спеціальних заходів, то їх випромінювання буде незалежним і сумарне випромінювання некогерентним. Для отримання досить потужного когерентного сигналу необхідно зробити ці осцилятори синфазними.

Причому для створення достатньої потужності випромінювання необхідно накопичити певну кількість електронів на високих енергетичних рівнях, тобто „накачати” джерело випромінювання. Стосовно ОКГ цей процес можна зобразити наступним чином (рис.5.2):

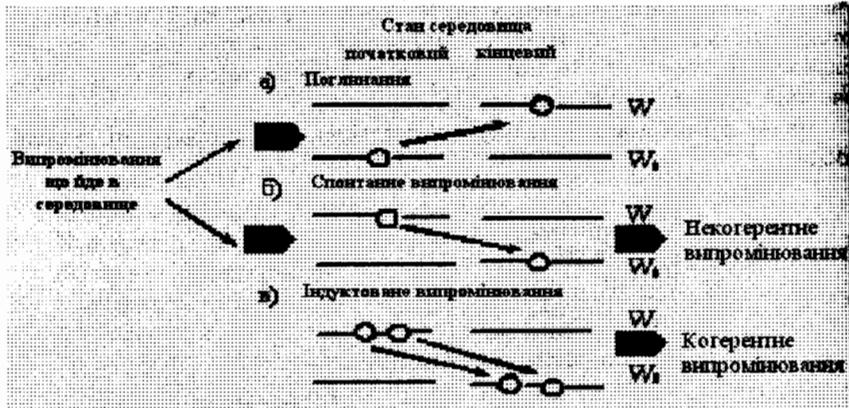


Рис. 5.2 – Процес накачки лазера

а) в результаті поглинання зовнішнього випромінювання атоми в опромінену середовищі переходять на вищий стабільний рівень, при цьому вихідного випромінювання немає;

б) спонтанно атоми переходять на нижчий рівень, що супроводжується випромінюванням, для джерела в цілому некогерентним, оскільки випромінювання окремих атомів відбувається незалежно;

в) велика група заздалегідь збуджених атомів під впливом зовнішнього сигналу „вимушено” – одночасно переходить на нижчий рівень – спостерігається інтенсивне когерентне випромінювання, синфазне зовнішньому керуючому когерентному сигналу. Це і є модель ОКГ.

Між частотою відбитого (або поглиненого) сигналу і різницею енергетичних рівнів ΔW існує однозначний зв'язок $\Delta W = h\nu$.

Перехід $\Delta W > 0$ відповідає випромінюванню кванта $+h\nu$, $\Delta W < 0$ відповідає поглинанню кванта $h\nu$. При цьому потрібно мати на увазі, що переходи на нижчий рівень можуть бути і безвипромінювальними.

У природному (не збудженому) стані населеність енергетичних рівнів електронами, здатними переходити на інші рівні, падає у міру підвищення рівня відповідно до закону Больцмана

$$N = N_0 \exp\left[-\frac{W - W_0}{kT}\right]$$

де: T – температура термодинамічної рівноваги між речовиною і випромінюванням; індексом «0» позначений нижній (основний) рівень, без значка – верхній.

При підготовці лазера до роботи шляхом накачування добиваються інверсійного стану – населеність верхніх рівнів (або одного з рівнів) стає більше, ніж нижніх. Для штучного збудженого стану звичайно також використовують останню формулу, але величині T приписують інше фізичне значення: її відмінність від дійсної температури речовини служить мірою населеності верхніх рівнів по відношенню до нижніх (при інверсії $T < 0$). Практично в процесі накачування і формування подальшого випромінювання беруть участь не два рівні, а три, чотири і більше.

Метод оптичного накачування не єдиний застосовується в лазерних системах. Окрім нього застосовуються, наприклад хімічні методи накачування, методи з використанням електричного розряду і інші.

Твердотільний лазер. На рис. 5.3 надана функціональна схема такого лазера. Він складається з випромінювальної головки, блоку конденсаторів, випрямляючого блоку, блоку підпалу та пульта керування.

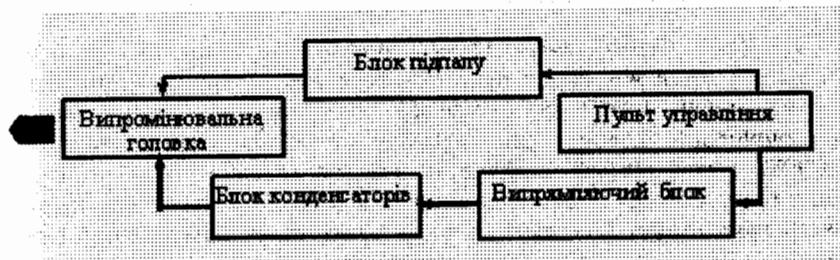


Рис. 5.3 – Функціональна схема твердотільного лазера

Випромінювальна головка перетворює електричну енергію спочатку в світлову енергію накачування, а потім в монохроматичне випромінювання. Блок конденсаторів забезпечує накопичення енергії. Випрямляючий блок служить для перетворення змінного струму в постійний струм, яким потім і заряджають конденсатори.

Блок підпалу виробляє дуже високу напругу, якою здійснюється первинний пробій газу в лампах-спалахах. Оскільки перший лазер був зроблений з використанням в якості активної речовини рубінового стрижня, то розглянемо саме його пристрій.

Випромінювальна головка рубінового лазера складається з утримувача рубіна, осрової втулки, двох ламп накачування і циліндрового рефлектору. Використаний в лазері рубін є оксидом алюмінію, в якій частина атомів заміщена атомами хрому. Кількість хрому визначає колір

рубіна, так блідо-рожевий рубін містить 0,05% хрому, червоний – 0,5%. Торцеві поверхні рубінових стрижнів обробляються з високою точністю, а потім поліруються. При цьому паралель торцевих поверхонь робиться з точністю до десятка кутових секунд, а самі поверхні покривають срібним або діелектричним шаром з високим коефіцієнтом віддзеркалення.

Такий стрижень поміщається між двома лампами-спалахами, які, у свою чергу, знаходяться в циліндровому або еліпсо-циліндричному рефлекторі, за допомогою якого здійснюється розподіл світлового потоку від ламп-спалахів на рубіновому стрижні.

У таблиці 5.1 приведені характеристики деяких твердотільних лазерів.

Таблиця 5.1 – Характеристики деяких твердотільних лазерів

Тип лазеру	Активна речовина	Енергія імпульсу, Дж	Тривалість імпульсу, нс	Потужність імпульсу, кВт
ОГМ-20	Рубін	0,42	20	$2 \cdot 10^4$
ЛТИПЧ-1	Скло з неодимом	2	15	$1 \cdot 10^5$
ЛТИ-5	Гранат з неодимом	0,05	10	$5 \cdot 10^5$

Газовий лазер. Для таких лазерів як активна речовина використовується або суміш газів, або речовина в пароподібному стані. Газова суміш полегшує отримання безперервного стимулюючого випромінювання, оскільки для переводу речовини в збуджений стан потрібна менша енергія. Вперше як активна речовина застосовувалася суміш гелію і неону. Атом гелію в процесі газового розряду збуджується електронами струму і переходить з основного рівня 1 на рівень 2 (рис. 5.4).

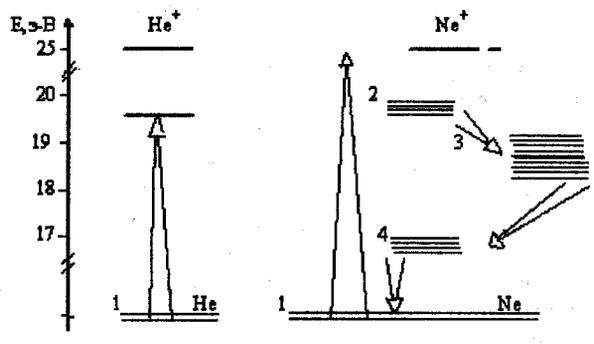


Рис. 5.4 – Накачка газового лазеру

При зіткненні атомів гелію з атомами неону останні також збуджуються і скоюють перехід на один з чотирьох верхніх підрівнів. У зв'язку з тим, що перерозподіл енергії при зіткненні двох частинок відбувається з мінімальною зміною загальної внутрішньої енергії, то атоми неону переходять в основному на рівень 2, а не на рівні 3 або 4. Внаслідок цього отримуємо перенаселеність верхнього рівня 2. Під час переходу атомів неону з рівня 2 на один з підрівнів 3 і з рівня 3 на один з підрівнів 4 виникає випромінювання.

Оскільки рівень 2 складається з чотирьох підрівнів, а рівень 3 – з десяти підрівнів, то теоретично є можливість більше тридцяти можливих переходів. Проте тільки п'ять переходів дають стимулююче випромінювання, яке зосереджене на довжинах хвиль: 1,118; 1,153; 1,199; 1,207 мкм.

Схему випромінювальної головки газового лазеру надано на рис. 5.5. Вона складається з газорозрядної трубки, охопленої електродами, до яких підводиться високочастотне поле, і двох сферичних дзеркал, що знаходяться поза трубкою. Вихідні вікна трубки розташовані під кутом Брюстера до оптичної осі приладу, що забезпечує якнайменші втрати при багаторазовому перевідбитті світлового потоку між дзеркалами резонатора. Випромінювання газового лазера відрізняється від випромінювання рубінового лазера режимом генерації (безперервний), високою монохроматичністю і когерентністю і більшою направленістю – його кутове розширення не перевищує однієї кутової хвилини. Вихідна потужність такого лазера складає 0,5...10 мВт при споживаній потужності 40...90 Вт.

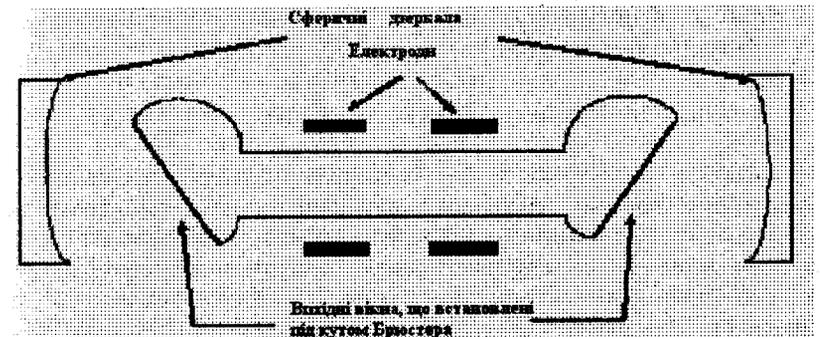


Рис. 5.5 – Схема випромінювальної головки газового лазеру

Характеристики газових лазерів надані в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Характеристики деяких типів газових лазерів

Тип лазеру	Довжина хвилі, мкм	Потужність випромінювання, Вт	Кутове розширення, мин
ЛГ-24М	0,63 ... 1,15	10^{-3}	20
ЛГ-45	0,63	$7 \cdot 10^{-3}$	10
ЛГ-55	0,63	$2 \cdot 10^{-3}$	10
ЛГ-65	1,15	$2 \cdot 10^{-2}$	15
ЛГ-75М	3,39 ... 3,51	10^{-2}	10
Малахит	0,45 ... 0,51	0,2 ... 0,5	...

Як активну речовину практично можна використовувати всі інертні гази. Значний розвиток одержав лазер, що працює на суміші азоту з вуглекислим газом, випромінювання якого зосереджене на хвилі 10,6 мкм і коефіцієнт корисної дії складає до 75%.

Напівпровідниковий лазер. Принцип роботи такого лазера пояснюється таким чином. Згідно квантової теорії електрони в напівпровіднику можуть займати дві широкі енергетичні смуги (рис. 5.6).

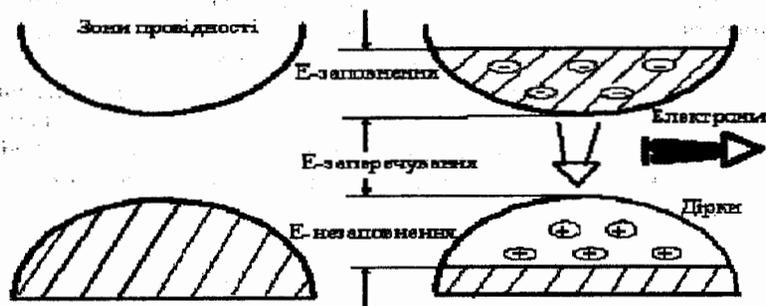


Рис. 5.6 – Принцип роботи напівпровідникового лазера

Нижня є валентною зоною, а верхня – зоною провідності. У нормальному чистому напівпровіднику при низькій температурі всі електрони зв'язані і займають енергетичний рівень, розташований в межах валентної зони. Якщо на напівпровідник впливати електричним струмом або світловими імпульсами, то частина електронів перейде в зону провідності. При цьому у валентній зоні опиняться так звані «дірки», що виконують роль позитивного заряду. Відбудеться перерозподіл електронів між рівнями зон і можна говорити про перенаселеність верхньої енергетичної зони. У деяких напівпровідниках, подібних арсеніду галію, в результаті зворотного переходу електронів з зони провідності з вищого

рівня у валентну зону і їх з'єднання з дірками, тобто при рекомбінації різномірних носіїв заряду, відбувається випромінювання фотонів.

Тут як активна речовина використовується арсенід галію, що містить домішки п-типу, концентрація яких складає $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Розміри шліфівки невеликі і складають частки міліметра. Торці такої заготовки виконують роль дзеркал, вони ретельно поліруються, робляться паралельними і утворюють резонатор. Верхня і нижня сторони є контактами, до яких підводиться напруга (рис. 5.7). У початковий період, поки струм малий, ширина спектральної смуги випромінювання достатньо широка, а при перевищенні струмом порогового значення вона звужується.

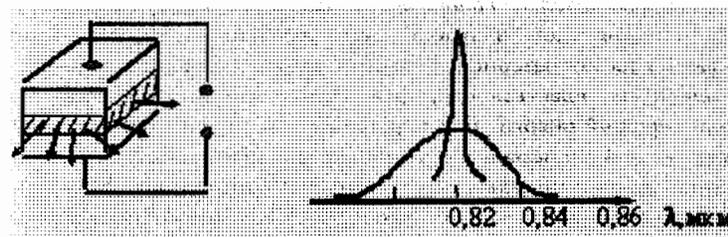


Рис. 5.7 – Схема напівпровідникового лазера та його спектральна характеристика.

Лазерний діод працює як в безперервному, так і в імпульсному режимах. Перевагою такого випромінювача є простота здійснення модуляції, для чого достатньо модулювати живлячий струм. Потужність випромінювання таких випромінювачів досягає десятка ватів.

Хімічний лазер. Ці лазери працюють практично без електричного живлення. При цьому інверсне населення рівнів енергії виникає за рахунок хімічних реакцій, що відбуваються. Правда, хімічні реагенти що беруть участь в реакції, повинні переміщатися і реагувати. Так, в одному з учасних рідинних лазерів робоча хімічна суміш прокачується через резонатор з надзвуковою швидкістю. Потужність випромінювання таких лазерів може досягати в імпульсі декількох ГВт в діапазоні довжин хвиль від 1,3 до 10,6 мкм.

Рідинний лазер. У цих лазерах робочим середовищем є рідкі діелектрики з домішковими робочими атомами. Виявилось, що, розчиняючи рідкоземельні елементи в деяких рідинах, можна одержати структуру енергетичних рівнів, дуже схожу з структурою рівнів домішкових атомів в твердих діелектриках. Тому принцип роботи рідинних лазерів той же, що і твердотільних. Був створений рідинний лазер з активною речовиною, яка випромінювала в діапазоні 0,5 ... 0,58

мкм (зелена частина спектру). Це випромінювання добре проникає у воду на великі глибини, тому такі ОКГ представляють інтерес для створення підводних локаторів.

Перевага рідинних лазерів: по-перше, не потрібно варити високоякісні стекла і рости кристали; по-друге, рідиною можна заповнювати будь-який об'єм. Недоліком таких лазерів є: нестійкість рідини по відношенню до великих інтенсивностей світла, а також зміна коефіцієнта заломлення активної речовини в процесі генерації від нагрівання.

Елементи лідарної техніки. Розглянемо деякі типові елементи, що використовуються при побудові лазерних систем дистанційного зондування природних об'єктів.

Модулятори лазерного випромінювання. Як правило, для забезпечення високої розрізняльної здатності по дальності лідарам необхідно сформувані короткі лазерні імпульси з крутим переднім фронтом. При цьому одночасно вдається одержати велику імпульсну потужність при невеликій середній енергії. Для вирішення цієї задачі можна модулювати параметри як самого лазера, так і резонатора. Застосовується зовнішня по відношенню до них модуляція лазерного випромінювання. У цьому плані перспективні електрооптичні, магнітооптичні, акустооптичні модулятори.

Електрооптичні модулятори засновані на електрооптичному ефекті. Він полягає у зсуві фази оптичного сигналу ($\Delta\phi$) у такт зміни зовнішнього модулюючого електричного сигналу. Зсув пропорційний напруженості модулюючого електричного поля в першому ступені (лінійний ефект Покельса) або другому ступені (квадратичний ефект Керра). Формула електрооптичного ефекту має вираз $\Delta\phi = \beta LE^m$, де β – стала електрооптичного матеріалу модулятора для даної довжини хвилі; L – довжина шляху оптичного сигналу в модуляторі; E – потужність електричного поля; показник $m = 1$ для модулятора Покельса та $m = 2$ для модулятора Керра.

Таким чином, оптичний сигнал лазера буде змінюватися згідно із законом, який може бути заданий генератором модулюючої напруги $E(\tau)$. Варіюючи цей закон, можна в значних межах змінювати структуру модульованого вихідного сигналу.

Аналогічні за принципом дії **магнітооптичні модулятори** – оптичні затвори, засновані на ефекті Фарадея: перемагнічування магнітного кристала модулюючим електричним струмом викликає поворот площини поляризації оптичного сигналу, що проходить через кристал. Метод модуляції вихідного сигналу струмом накачування застосовується при модуляції напівпровідникових лазерів.

Розглянуті методи модуляції дозволяють одержати частоту посилок імпульсів до $10^6 - 10^7$ с⁻¹.

Іншим, також широко поширеним, методом модуляції лазерного випромінювання є **модуляція добротності резонатора**. Як відомо, добротність будь-якої коливальної системи обернено пропорційна ширині смуги частот, займаної спектром коливань в даній системі. Основним оптико-механічним варіантом управління добротністю лазерів є поворот одного з дзеркал резонатора. Тільки в той момент, коли дзеркала строго паралельні один одному, створюється умова резонансу в системі лазер – дзеркало і оптичний сигнал випромінюється назовні. У подібних системах лазер поволі „накачується”, а потім випромінюється гігантський імпульс.

Задача полягає в тому, щоб створити конструкцію, в якій прозорість і добротність системи виявилися б максимальними в той момент, коли активна речовина максимально накачана.

Всі розглянуті вище модулятори призначені для створення коротких імпульсів з достатньо крутим фронтом. У разі, коли необхідно управляти поляризацією лазерного сигналу або його напрямком, звичайно використовуються твердотілі поляризатори (поляроїди), наприклад призма Нікольсу, в якій використовується ефект подвійного променезаломлення анізотропних кристалів, або оптико-механічні модулятори напрямку (дефлектори) – дзеркала (або призми) повного внутрішнього віддзеркалення, які можуть бути нерухомими або повертатися по заданому куту.

Елементи оптичної виміральної техніки. Одним з найпоширеніших приладів, який дозволяє визначати кількісні характеристики прийнятого оптичного сигналу, є інтерферометр Фабрі – Перо (ІФП) (рис. 5.8).

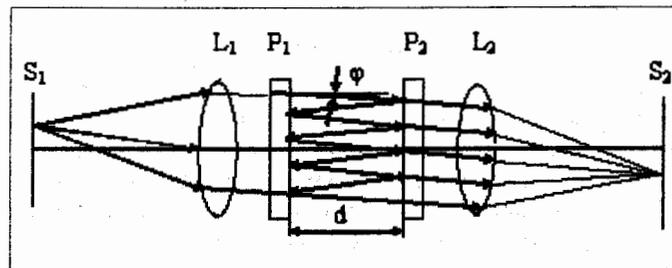


Рис.5.8 – Інтерферометр Фабрі-Перо

Це дві скляні, паралельно розташовані металеві або діелектричні покриття з коефіцієнтом віддзеркалення 0,90–0,98. Світловий пучок після багатократного віддзеркалення, перетворюється в систему світлових пучків. Різниця ходу між ними визначається відстанню між пластинками і

кутом падіння світлового пучка. Якщо лінзою зібрати їх на екрані, то вони дадуть інтерференційну картину (рис. 5.9).

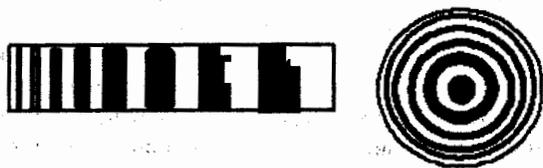


Рис. 5.9 – Типові інтерференційні картини ІФП

Після кожної пари віддзеркалень (від правого, а потім від лівого дзеркала) оптичний промінь, виходячи з інтерферометра, набуватиме різницю ходу $\Delta = 2d \cos \varphi$. При рівності цієї різниці цілому числу хвиль $m = 1, 2, 3, \dots$

$$\Delta = \frac{\lambda}{2} \times 2m = \lambda m$$

вихідний сигнал інтерферометра буде максимальний;

$$\Delta = \frac{\lambda}{2} (2m + 1)$$

при рівності непарній кількості на півхвиль – повністю погашений.

Таким чином, інтерферометр може служити фільтром, через який проходять наперед задані частоти (довжини хвиль), кратні один одному.

Умову максимального пропускання інтерферометра можна представити у вигляді

$$2d \cos \varphi = m \lambda$$

де: $m = 1, 2, 3, \dots$

Варіюючи d або φ , можна одержати максимальний або мінімальний сигнал для різних довжин хвиль. Для вимірювання може використовуватися трансформація інтерференційної картини у кільця Ньютонів. Типові інтерференційні картини ІФП мають вигляд (рис.5.9). Світлі смуги (кільця) що видно під кутом φ , визначаються співвідношенням

$$\cos \varphi = m \lambda / 2d$$

де: d – відстань між пластинами; m – порядок максимуму.

З цього співвідношення видно, що чим далі розташовані смуги (кільця), тим менше відстань між ними.

Якщо відстань між пластинами фіксована, то прилад називається еталоном, якщо відстань (або кут падіння проміння) регулюється, – то

інтерферометром. Якщо ж відстань між пластинами міняти по будь – якому наперед заданому закону, то прилад перетворюється на спектрометр.

Зживане у вимірювальних системах оптичне гетеродинування (фотозмішування) дозволяє здійснити когерентне оптичне детектування. При цьому два оптичні сигнали (що приймаються і від опорного оптичного гетеродина), змішуючись, можуть сформувати високочастотний радіосигнал безпосередньо на поверхні фотодетектора. У інших випадках такий же ефект виходить при змішуванні двох оптичних сигналів, породжених одним лазером, але по-різному зсунутих по частоті внаслідок взаємодії з досліджуванним об'єктом.

5.2 Взаємодія лідарного сигналу з навколишнім середовищем

Здатність лідарних вимірювальних систем виконувати кількісний спектральний аналіз навколишнього середовища на значних відстанях ґрунтована на метричній (інформаційній) трансформації лідарного сигналу в результаті його взаємодії з середовищем. Зворотний інформаційний сигнал лідару може бути прийнятий як на частоті сигналу, посланого лідаром, так і на інших частотах. Інформація про об'єкт, що вивчається, може бути отримана з інтенсивності зворотного сигналу на одній або декількох частотах; із зміни спектрального складу або поляризації сигналу [11].

Розглянемо основні ефекти, що виникають при взаємодії лідарного сигналу з об'єктами природного середовища. При цьому інтенсивність взаємодії характеризуватимемо перерізом розсіяння (віддзеркалення) або випромінювання, або поглинання.

Доплерівський зсув частоти лазерного сигналу є метричною властивістю при вимірюванні руху середовища, в якій розповсюджується сигнал або руху об'єкта, від якого він розсіюється. Для виділення доплерівського зсуву звичайно порівнюють по частоті два сигнали – вимірювальний, що пройшов через середовище і розсіявся від об'єкта, і опорний, який минає об'єкт (середовище). Іноді застосовується і інший – диференціальний метод, коли обидва розщеплені сигнали проходять через досліджуваний об'єкт, але під різними кутами по відношенню до вектора руху перевипромінювача. Якщо рух перевипромінювача не стаціонарний, а має флуктуації, то утворюється спектр зміщених частот. Його ширина пропорційна ширині спектра флуктуацій швидкості руху перевипромінювача.

Віддзеркалення від поверхні об'єкта викликає зміну інтенсивності і поляризації сигналу, а частково – і спектрального складу. Час проходження сигналу до поверхні і назад визначає відстань до неї.

Релеєвське розсіяння і розсіяння Мі лазерного випромінювання є пружним (без зміни частоти) розсіянням сигналу атомами і молекулами, їх флукуаційними скупченнями, аерозолями атмосфери. Переріз розсіяння залежить від співвідношення між довжиною хвилі випромінювання і розмірами розсіювачів, а також від кута, під яким приймається розсіяний сигнал. Відносно дрібні (в порівнянні з довжиною хвилі) розсіювачі мають індикатрису розсіяння, що підкоряється закону Релея; частинки, порівнянні за розмірами з довжиною хвилі випромінювання, мають індикатрису розсіяння, що підкоряється закону Мі. У останньому випадку рівень розсіяного сигналу може виявитися значно сильніше релеєвського. Це означає, що за наявності крупних за розмірами розсіювачів однієї компоненти сигнали релеєвського розсіяння інших компонент можуть виявитися замаскованими.

Резонансне релеєвське розсіяння випромінювання, що має більший перетин розсіяння, спостерігається в тому випадку, якщо лазерне випромінювання співпадає по частоті з частотою певного атомного переходу.

Комбіноване розсіяння світла (КРС) – непружне, тому із зміною частоти сигналу воно виникає в результаті модуляції лідарного сигналу власними коливаннями досліджуваних молекул. КРС має дві компоненти, віддалені за шкалою частот на рівних відстанях від зондового сигналу. Ці відстані цілком визначаються властивостями досліджуваних молекул, а амплітуди цих компонент – концентрацією досліджуваних молекул.

Флуоресценція (атомна і молекулярна) – випуск фотонів з частотою, меншою за частоту лазерного опромінювання. Це явище виникає внаслідок поглинання лазерного випромінювання, якщо його частота співпадає з частотою певного електронного переходу в атомі або молекулі досліджуваної речовини.

Поглинання лазерного сигналу спостерігається при збіг частоти випромінювання із смугою поглинання досліджуваної молекули. При цьому ступінь послаблення лазерного випромінювання служить мірою концентрації досліджуваної речовини (наприклад, водяної пари або озону).

Усі розглянуті явища спостерігаються при опромінюванні об'єктів лідарним сигналом певної частоти. Часто також використовується **диференціальний метод**, при якому опромінювання ведеться на двох близьких частотах. Вони вибираються так, щоб на одній частоті ефект розсіяння (або поглинання) був максимальний, а на іншій частоті – декілька менше. Такі методи називаються диференціальним поглинанням або розсіянням (ДПР) і використовуються з метою виключити роль інших спотворюючих ефектів, які однакові (або достатньо близькі) на обох частотах.

5.3 Вимірювання параметрів навколишнього середовища лідарними методами

Виявлення домішок в атмосфері методом комбінаційного розсіяння світла (КРС). Явище КРС полягає у тому, що при зустрічі оптичного сигналу з молекулами повітря (або домішок в ньому) відбитий (розсіяний) сигнал формується не тільки на частоті зондового сигналу ν_0 , а і на інших частотах, віддалених від зондового на відстанях $\pm \nu'$. Ці частоти визначені властивостями молекул речовини, яка зондується. Нижчеказане явище пов'язане з модуляцією зондового сигналу власними коливаннями досліджуваних молекул. Бічні сигнали КРС з частотами ($\nu_0 - \nu'$), тобто нижчими, ніж ν_0 , прийнято називати червоними (або стоксовими), а з частотами ($\nu_0 + \nu'$), тобто більш високими, чим ν_0 – фіолетовими (або антистоксовими).

Зсув цих бічних частот співпадає з частотами поглинання, характерними для молекул речовини. Під дією електричного поля оптичної хвилі в випромінюючих молекулах наводиться електричний момент P , що породжений змінами напруженості електричного поля оптичної хвилі зондового сигналу (E). Не приводячи математичних обчислень, можна показати, що розсіяний сигнал складається з трьох частин: з частотою зондування ν_0 , з підвищеною «фіолетовою» частотою ($\nu_0 + \nu'$) і із зниженою «червоною» частотою ($\nu_0 - \nu'$). Іншими словами, зондовий сигнал модулюється молекулами, що досліджуються. По інтенсивності бічні складові не повинні відрізнятися один від одного, проте насправді, інтенсивність «червоної» складової декілька вища, що пояснюється квантовою теорією випромінювання.

Достатньо широке розповсюдження методу КРС пов'язане з наступними обставинами:

- завдяки високій монохроматичності основний сигнал не затіняє бічні складові; сигнали надійно розділяються по частоті;
- сигнал збудження інтенсивний, відповідно сильним виявляється і відгук досліджуваних молекул, який може бути точно замірний. Причому, завдяки когерентності зондового сигналу, виявляється можливим сформувати у відповідь сигнал також когерентним;
- сучасні лазери можуть перестроюватися по частоті, тому при наявності досліджуваних молекул, що розрізняються по власних частотах, останні можуть бути послідовно прозондовані при максимальних перетинах КРС;
- при необхідності можна одержати велику крутизну фронту і малу тривалість зондового імпульсу при достатньо високій його потужності і стежити за швидко протікаючими процесами.

На рис. 5.10 показані лінії КРС атмосферних газів і відповідні поперечні перетини зворотного комбінаційного розсіяння червоної (стоксової) області спектру при частоті випромінювання

$$\nu = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,6943 \cdot 10^{-4}} = 14400 \text{ см}^{-1} (\Delta\nu_{\text{КРС}} - \text{різниця частот зондування і розсіяння КРС}).$$

Комбінаційні частоти не залежать від частоти зондового сигналу, проте переріз зворотного КРС залежить від того, на якій довжині хвилі виконується зондування.

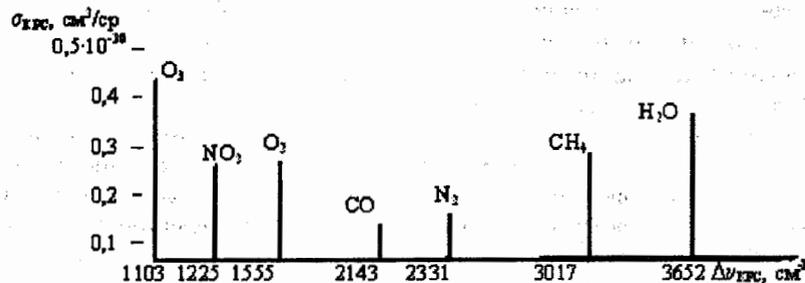


Рис. 5.10 – Лінії КРС атмосферних газів та відповідні поперечні перетини зворотного комбінаційного розсіяння

Знаючи переріз зворотної КРС досліджуваної речовини ($\sigma_{\text{КРС}}$) і визначивши приріст інтенсивності сигналу КРС, який відповідає одиничному шляху зондування (dI/dx), можна визначити кількість досліджуваної речовини (кількість молекул n в одиниці об'єму).

При виборі параметрів апаратури КРС по можливості прагнуть до того, щоб частота зондового сигналу опинилася в смузі прозорості атмосфери. В той же час частота КРС повинна лежати у області великих перерізів зворотного КРС; притому бажано, щоб ослаблення сигналу КРС на шляху від точки зондування до апаратури було мінімальним. Ефект КРС різко посилюється, якщо опромінювання могутнім лідарним сигналом викликає резонансні ефекти.

На рис. 5.11 представлено структурну схему лідарної інформаційно-виміральної системи, призначеної для спостереження за вертикальним профілем вогкості і домішок в атмосфері.

Принцип вимірювання тут заснований на порівнянні двох оптичних сигналів: опорного, посланого в атмосферу, і зворотного, комбінаційно-розсіяного. В даному випадку використовується лазер, який може

перестроюватися по частоті, з тією метою, щоб поперечний перетин досліджуваних молекул і відповідно зворотний сигнал були максимальними.

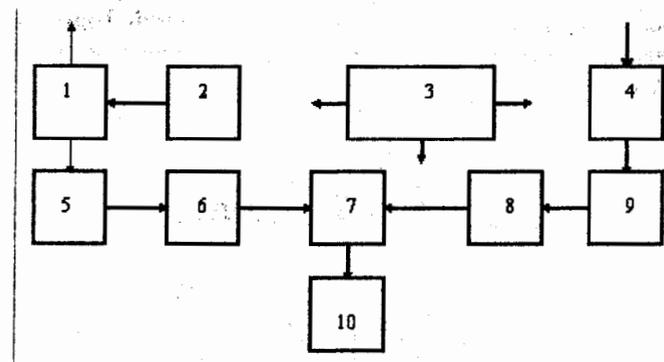


Рис. 5.11 – Структурна схема лідарної інформаційно – виміральної системи

Оптичний сигнал від лазера 2, що перестроюється по частоті, через систему дзеркал 1 випромінюється в атмосферу. Частина енергії лазера прибує через фотоперетворювач з підсилювачем 5 в схему затримки 6, де сигнал затримується на якийсь час, необхідний для проходження випромінювання до зондованого об'єму і назад. З виходу цього пристрою сигнал подається в блок порівняння 7, куди поступає також прийнятий комбінаційно-розсіяний сигнал, що поступив з атмосфери в приймальний телескоп 4 і що пройшов через систему фільтрів 9, фотоперетворювач з блоком формування прийнятого сигналу 8. З виходу схеми порівняння сигнал подається на аналізатор спектру. Всі блоки системи синхронізуються синхронізатором 3.

Вимірювання повітряних потоків та турбулентності. Робота цих виміральної систем заснована на використанні ефекту доплерівського зсуву частоти сигналу, відбиваного рухомих об'єктом. З цієї причини ці системи називаються лазерними доплерівськими виміральної системами (ЛДВС). Іноді їх називають лазерними доплерівськими вимірниками швидкості. Найбільше поширення набули диференціальні системи. В них опорний лазерний промінь розділяється на два і кожний з них опромінює об'єкт так, що доплерівський зсув частоти в двох променях має різні знаки. Векторна різниця променів визначається по їх взаємній інтерференційній картині.

На рис. 5.12а показаний диференційований (оптичний)

доплерівський сигнал: максимуми відповідають світлим, а мінімуми - темним смугам інтерференційної картини у області зустрічі оптичних променів. Абсолютний максимум розташований в центрі області зустрічі; у міру зсуву до периферії освітленість світлих смуг слабшає. Після перетворення цього оптичного сигналу в електричний формується строго періодична послідовність, яка потім поступає на обчислювальний пристрій (рис. 5.126).

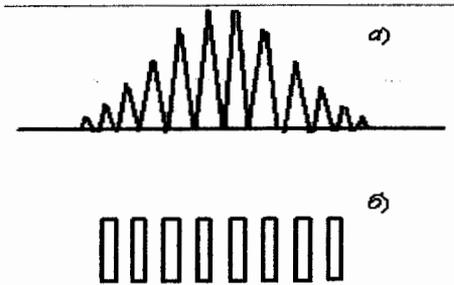


Рис. 5.12 – Оптичний доплерівський сигнал, який виникає при проходженні однієї розсіювальної частинки в точці перетину двох гаусових променів

Частота проходження імпульсів визначає доплерівський зсув оптичного сигналу, що відповідає проекції швидкості частинки на вісь променя. Тривалість серії імпульсів визначає час проходження частинкою області перетину оптичного проміння, і характеризує швидкість її руху поперек системи смуг, що інтерферують.

Лазерна далекометрія та локація. Задача визначення відстані між далекоміром і ціллю зводиться до вимірювання відповідного інтервалу часу між зондовим сигналом і відбитим від об'єкту.

Розрізняють три методи вимірювання дальності залежно від того, який характер модуляції лазерного випромінювання використовується в далекомірах:

- імпульсний,
- фазовий,
- імпульсно-фазовий.

Суть першого методу аналогічна відомому з радіолокації. Точність вимірювання часових інтервалів, що сягає цим методом, складає 10^{-9} с (порядку 30 см). При фазовому методі далекометрії лазерний сигнал модулюється по гармонійному закону, при цьому інтенсивність випромінювання міняється в значних межах. Залежно від дальності до об'єкту міняється фаза сигналу, що дійшов до нього, і фаза відбитого

сигналу. Якщо відомий тип об'єкту, що визначає фазовий зсув при відзеркаленні, вдається одержати значно вищу точність вимірювання відстані. Наприклад, при частоті модуляції лазерного випромінювання 10 МГц, погрішність вимірювання відстані складає декілька сантиметрів. У табл. 5.3 наведені характеристики деяких лазерних далекомірів.

Таблиця 5.3 – Характеристики лазерних далекомірів

Тип далекоміру	Джерело випромінювання	Довжина хвилі, мкм	Потужність, мВт	Дальність, км	Погрішність, см
ГД-314	Арсенід галію	0,91	0,5	2	5
КДГ-3	Арсенід галію	0,91	1,0	2	2
«Кварц»	Гелій - неон	0,63	5,0	30	1
«Кварц-3»	Гелій - неон	0,63	2,0	1	0,2

Принцип побудови оптичних локопів (лідарів) практично не відрізняється від радіолокопів (радарів). Проте, враховуючи властивості твердого випромінювання, в цьому випадку вдається одержати значно більш точні характеристики. Наприклад, в оптичних системах слідування за супутниками (ракетами) застосовуються лідари, суміщені з радаром. Останні використовуються для грубого наведення на ціль. При дальності до супутника більше 1500 км такі лідари дозволяють отримати точність вимірювання відстані ± 8 м. Оцінюючи такі експерименти необхідно враховувати значну швидкість супутника – більше 10^4 км/год і відносно невеликі його розміри. Такі вимірювання можна порівняти з пострілом в око мухи з відстані в 5 км, коли вона летить із швидкістю 100 км/год.

Контрольні запитання

- 1) Що таке лазері? Особливості їхнього випромінювання
- 2) Класифікація лазерів
- 3) Фізичні принципи роботи лазерів
- 4) Конструктивні особливості лазерів
- 5) Функціональна схема твердотільних лазерів
- 6) Газові, рідинні та хімічні лазері
- 7) Принцип роботи, схема та спектральна характеристика напівпровідникових лазерів
- 8) Методи модуляції лазерного випромінювання
- 9) Які елементи оптичної вимірювальної техніки використовують у приймачах оптичного діапазону?
- 10) Охарактеризуйте ефекти при взаємодії лідарного сигналу з об'єктами природного середовища

- 11 В чому полягає метод КРС?
- 12 Структурна схема лідарної інформаційно-вимірювальної системи
- 13 Принцип роботи лідарів при спостереженні за вертикальним профілем вологості та домішок в атмосфері
- 14 Оптичні методи вимірювання повітряних потоків та турбулентності
- 15 Оптичні методи далекометрії та локації

6 Мікрохвильове зондування навколишнього середовища

6.1 Основні поняття про радіотеплове випромінювання навколишнього середовища і його характеристики

Одним з методів дистанційного зондування об'єктів навколишнього середовища є *метод пасивної електромагнітної локації*, заснований на вимірюванні власного електромагнітного випромінювання цих об'єктів. У радіодіапазоні, разом з терміном пасивна радіолокація, використовується термін *радіотеплолокація*. У основі цих методів лежить той факт, що всяке тіло, температура якого відмінна від абсолютного нуля, випромінює електромагнітні хвилі в широкому діапазоні частот. Джерелом такого випромінювання є випадковий тепловий рух електронів, що знаходяться усередині даного тіла. *Сумарна потужність* ($\text{Вт}/\text{м}^2$), випромінювана тілом у всьому діапазоні частот з одиничної площі в одиницю часу, визначається формулою

$$\Pi = \frac{dP}{ds \cos \varphi},$$

де: P – повна потужність, випромінювана нагрітим теплом у всьому діапазоні частот, s – поверхня тіла, φ – кут між напрямом випромінювання та нормаллю до елемента ds . *Спектральною щільністю потоку потужності* називають спектр потужності радіотеплового випромінювання ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$) суцільний і звичайно нерівномірний, який визначається формулою

$$\Pi_f = \frac{d\Pi}{df}.$$

Потужність радіотеплового випромінювання, яка поступає на вхід приймача, залежить від відстані до точки спостереження. Для виключення цієї залежності, спектральну щільність потоку потужності відносять до одиниці тілесного кута Ω і користуються поняттям *спектральної інтенсивності випромінювання* або *спектральною яскравістю*, вимірюваною в $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц} \cdot \text{ср})$

$$B_f = \frac{d\Pi_f}{d\Omega}.$$

Спектральна яскравість тіла залежить від його температури та випромінювальної здатності. Для абсолютно чорного тіла, яке повністю поглинає падаючу на нього променисту енергію і перетворює її на тепло, ця залежність виражається *формулою Планка*.

У радіодіапазоні ($\lambda > 1$ мм) формулу Планка і спектральну характеристику – спектральну яскравість можна записати у вигляді:

$$B_f = \frac{2k}{\lambda^2} T,$$

де: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц·К) – стала Больцмана, λ – довжина хвилі, що падає на тіло, T – абсолютна температура тіла К.

Останнє співвідношення носить назву *формули Релея-Джінса* і показує залежність яскравості абсолютно чорного тіла від довжини хвилі в радіодіапазоні. Оскільки в цьому діапазоні більшість тіл по своїх параметрах близька до абсолютно чорного тіла, їх термодинамічна температура може служити енергетичною характеристикою випромінювання. З другого боку, по випромінюваній тілом енергії можна судити про його температуру.

Довжина хвилі максимального теплового випромінювання (λ_m) визначається *законом Вина*:

$$\lambda_m = \frac{3 \cdot 10^3}{T},$$

де T – температура тіла, К.

Довжина хвилі максимального випромінювання, як правило, виходить в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль. Реальні тіла не є абсолютно чорними і окрім поглинання ще і відбивають і пропускають через себе падаючу на них енергію. Для таких тіл має місце співвідношення $\gamma + \rho + q = 1$, де γ – коефіцієнт поглинання, ρ – коефіцієнт відбиття, q – коефіцієнт пропускання. Відповідно, падаюча на тіло потужність $P_{\text{пад}}$: частково поглинається ($P_{\text{погл}} = \gamma P_{\text{пад}}$), частково відбивається ($P_{\text{від}} = \rho P_{\text{пад}}$), частково проходить крізь тіло ($P_{\text{прох}} = q P_{\text{пад}}$).

Відповідно до *закона Кірхгофа*, співвідношення для абсолютно чорного тіла залишаються у силі і для реальних тіл, але в частині лише поглинутої ними потужності. Внаслідок цього, яскравість реального тіла може бути визначена співвідношенням

$$B_f^* = \gamma B_f,$$

де γ – випромінювальна здатність.

Коефіцієнт поглинання γ характеризує тіло як джерело радіотеплового випромінювання і зветься *випромінювальною здатністю*.

Таким чином, що чим менше тіло відбиває падаючу на нього енергію, тим більше поглинає, а, отже, і тим більше випромінює. В силу цього радіолокаційні зображення об'єктів, які отримані за допомогою активних РЛС і приймачами власного випромінювання, можна порівнювати між собою як позитив і негатив.

Яскравість реального тіла в діапазоні радіохвиль також може бути визначена формулою Релея-Джинса за умови, що замість дійсної термодинамічної температури підставити *яскравісну (радіояскравісну) температуру*, яка визначається співвідношенням $T^* = \gamma T$.

Повне випромінювання реального тіла, яке сприймається приймальним пристроєм, є сумою власного радіотеплового випромінювання і енергії, відбитої тілом і обумовленою його відбивною здатністю. В цьому випадку інтенсивність повного випромінювання тіла можна характеризувати *ефективною яскравісною температурою*

$$T_{\text{еф}}^* = \gamma T + \rho T_{\text{зв}},$$

де: T – термодинамічна температура тіла, $T_{\text{зв}}$ – температура зовнішнього випромінювання, ρ – коефіцієнт віддзеркалення тіла.

Можливість розрізнити два тіла по їх радіотепловому випромінюванню залежить від контрасту їх ефективних температур яскравості. Для однаково нагрітих тіл цей *контраст яскравості* визначається співвідношенням

$$\Delta T_{\text{зф}}^* = T_{\text{зф}1}^* - T_{\text{зф}2}^* = (\gamma_1 - \gamma_2)T,$$

де: γ_1 і γ_2 – випромінювальні здібності тіл.

Радіотеплове випромінювання, що приймається антеною приймача, звичайно характеризують *антенною температурою*.

$$T_a = \frac{D}{4\pi} \int_{4\pi} T_{\text{еф}}^*(\Omega) F(\Omega) d\Omega$$

де: $T_{\text{еф}}^*(\Omega)$ і $F(\Omega)$ – ефективна температура яскравості тіла та діаграма направленості антени у функції тілесного кута.

Аналогічно контрасту температур яскравості користуються і контрастом антенних температур

$$\Delta T_a = T_{a1} - T_{a2} = T_{\text{еф}}^*(1 - \beta)\eta$$

При розгляді малих об'єктів, кутові розміри яких $\Omega_{\text{ц}} < \Omega_{\text{гл}}$ контраст антенних температур буде

$$\Delta T_a = \Delta T(1 - \beta)\eta \frac{\Omega_{\text{ц}}}{\Omega_{\text{гл}}},$$

де: $\Omega_{\text{ц}}$, $\Omega_{\text{гл}}$ – тілесний кут цілі і тілесний кут головної пелюстки відповідно,

$\beta = 0,2-0,3$ – коефіцієнт, що характеризує частку всюди направлено випромінювання, що приймається антеною поза головною пелюсткою, η – коефіцієнт корисної дії антенного тракту.

У випадку $\Omega_{\text{ц}} \ll \Omega_{\text{гл}}$ контраст антенних температур буде малим навіть при високому контрасті яскравості цілі та фону.

Випромінювальна здатність природних об'єктів. Розглянемо чистотний спектр випромінювальної здатності природних об'єктів – земних покровів, акваторій, повітря, хмар, туманів, смогу і ін.

Звичайно відмінність у випромінювальній здатності реального і абсолютно чорного тіла характеризується величиною *коефіцієнта теплового випромінювання* або *ступенем чорноти тіла* ϵ_{λ} .

Для води і льоду цей коефіцієнт залежить не тільки від їх фізико-хімічних властивостей, але і від стадії формуванні льоду, схвильованості водної поверхні, чистоти води (льоду) і інших факторів. Причому для льоду діапазон значень ϵ_{λ} достатньо широкий, що обумовлено різною структурою льоду і, отже, ступенем наближення до властивостей чорного тіла.

У інфрачервоному діапазоні (ПЧ) випромінювальні здібності води і льоду достатньо близькі. У видимому діапазоні лід значно ближче до чорного тіла, ніж вода, а в НВЧ – діапазоні, навпаки, лід володіє більшою випромінювальною здатністю, ніж вода. Відповідно відмінність температур радіояскравості водної і крижаної поверхонь в ПЧ – діапазоні повинна визначатися в першу чергу – їх термодинамічними температурами і додатково структурою: для води – ступенем хвилювання і наявністю піни і бризок, для льоду – густиною і будовою поверхні.

У радіодіапазоні, а також у видимому діапазоні відмінність між випромінювальними здатностями, а також і температурами яскравості води і льоду повинна визначатися, перш за все, їх спектральними коефіцієнтами теплового випромінювання (чорнота), що використовується для розпізнавання води і льоду.

Вплив домішок на випромінювальну здатність води і льоду змінюється в різних діапазонах по-різному. У діапазоні довжин хвиль 10-100 см вплив солоності великий, притому воно істотно збільшується у міру переходу в більш довгохвильову частину спектру. Це використовується для визначення ступеня солоності морської води по радіовипромінюванню. Зрозуміло, що для цього необхідні вимірювання в різних діапазонах: де вплив солоності великий і де малий, тобто в більш короткохвильовій частині спектру.

Коефіцієнт *теплового випромінювання земних покровів* істотно залежить від вологості, від виду рослинності і, зрозуміло, від довжини хвилі випромінювання. Визначено, наприклад, що в міліметровому діапазоні залежність коефіцієнта теплового випромінювання від вологості

мала, а в сантиметровому – значна. Відзначимо, що з збільшенням абсолютної вологості коефіцієнт теплового випромінювання ґрунту різко знижується, що і використовується як метрична властивість при дистанційному зондуванні ґрунтів.

Реальні поверхні істотно розрізняються також по тому, як змінюється їх випромінювальна здатність у міру відхилення кута зондування від вертикалі. Для полірованих металевих поверхонь коефіцієнт теплового випромінювання мінімальний, проте у міру відхилення кута зондування від вертикалі він зростає, причому і при вертикальній і при горизонтальній поляризації приймальної антени. Для трав'яного покриву коефіцієнт теплового випромінювання також не залежить від поляризації, проте при відхиленнях кута зондування від вертикалі він зменшується. Для води він залежить як від виду поляризації, так і від кута зондування. Залежно від властивостей підстильної поверхні, змінюються також поляризаційні характеристики відбитих від них сигналів.

Таким чином, температура радіояскравості природних об'єктів значно залежить від стану підстильної поверхні і тому використовується як одна з метричних властивостей.

Теплове випромінювання об'єктів формується в деякому шарі, глибина якого залежить від фізичних властивостей цих об'єктів і діапазону довжин хвиль, в якому виконується вимірювання. Для суцільних середовищ (твердих або рідких) товщина випромінюючого шару в НВЧ-діапазоні, як правило, невелика. Для напівпрозорих тіл, якими є хмари і тумани, товщина випромінюючого шару може досягати великих значень. Більш того, в деяких випадках досліджувана хмара (туман) може виявитися настільки прозорою, що крізь нього від інших об'єктів (Земля, Сонце, інші хмари) проходить випромінювання більше, ніж випромінювання досліджуваної хмари (туману).

Для *радіотеплового випромінювання атмосфери* маємо наступне. Випромінювальна здатність атмосфери, як і будь-якого іншого тіла, визначається її поглинальною здатністю. При дистанційному зондуванні випромінюючим є стовп атмосфери, обмежений діаграмою направленості. Температура яскравості атмосфери може бути представлена у вигляді $T^*(\lambda) = |T_0 - \Delta T| \Gamma(\lambda)$. Ця формула визначає температуру яскравості безхмарної атмосфери. В ній: T_0 - температура атмосфери у земної поверхні, ΔT - поправка на неізотермічність, $\Gamma(\lambda)$ - оптична товщина всієї атмосфери в діапазоні НВЧ.

Для радіотеплового зондування хмар і опадів з поверхні Землі необхідно, щоб існував контраст між температурами яскравості хмарної і безхмарної атмосфери і контраст антенних температур перевищував чутливість приймального пристрою.

Для прикладу визначимо контраст яскравості при спостереженні із земної поверхні одношарової хмарності. При цьому впливом бічних нелюсток діаграми направленості нехтуватимемо. В цьому випадку контраст яскравості може бути представлений у вигляді (рис.6.1)

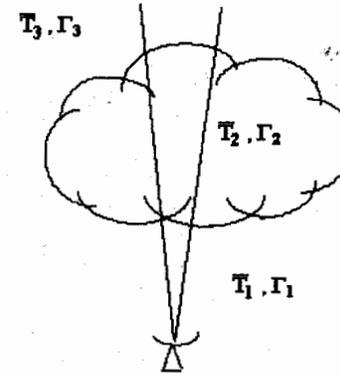


Рис.6.1 – Визначення контрасту яскравості при спостереженні із земної поверхні одношарової хмарності

$$\Delta T^* = \bar{T}_1 (1 - e^{-\Gamma_1}) + \bar{T}_2 (1 - e^{-\Gamma_2}) e^{-\Gamma_1} + \bar{T}_3 (1 - e^{-\Gamma_3}) e^{-(\Gamma_1 + \Gamma_2)} - \bar{T}_{\text{атм}} (1 - e^{-\Gamma_{\text{атм}}})$$

де:

- \bar{T}_1 – середня температура підхмарного шару атмосфери;
- Γ_1 – оптична товщина підхмарного шару;
- \bar{T}_2 – температура в шарі хмари;
- Γ_2 – коефіцієнт поглинання в хмарі;
- \bar{T}_3 – середня температура надхмарного шару атмосфери;
- Γ_3 – оптична товщина надхмарного шару атмосфери;
- $\bar{T}_{\text{атм}}$ – середня температура безхмарної атмосфери;
- $\Gamma_{\text{атм}}$ – оптична товщина безхмарної атмосфери.

Для складніших атмосферних моделей (багаторясна хмарність) цей вираз ускладнюється. При спостереженні зон хмар і опадів зверху,

наприклад, з літака або метеорологічного супутника, необхідно врахувати власне радіотеплове випромінювання земної поверхні і випромінювання газів атмосфери і хмар, відбите від земної поверхні. Як приклад в таблиці 6.1 приведені розрахункові значення контрастів яскравості при спостереженні хмар і опадів з поверхні Землі.

Таблиця 6.1 – Розрахункові значення контрастів яскравості при спостереженні хмар і опадів з поверхні Землі

Хмари	Кут нахилу антени до горизонту			
	90°	60°	30°	10°
Шаруваті	0	0	0	1
Шарувато – купчасті I = 1 мм/год I = 5 мм/год	9	10	18	49
	27	30	51	129
Купчасто – дощові I = 20 мм/год	129	143	195	198

6.2 Технічні засоби мікрохвильового зондування

Гранично досяжна точність вимірювань при пасивній електромагнітній локації залежить, перш за все, від рівня власних шумів приймачів в заданому частотному діапазоні. Чим нижчі власні шуми, тим з більшою точністю можуть виконуватися вимірювання.

Традиційні методи придушення шумових перешкод у вимірювальних системах пов'язані з інтегруванням сигналу в часі або виділенням сигналу по його кореляційних характеристиках, якщо вони відрізняються від шумових. При інтегруванні регулярна інформаційна частина сигналу росте пропорційно часу інтегрування, а для шумової спостерігається флуктуація навколо середнього значення, внаслідок чого в міру збільшення часу інтегрування збільшується перевищення сигналу над шумом.

З теорії оптимальної обробки сигналів виходить, що можна одержати перевищення сигналу над шумом, рівне:

$$\frac{\text{Сигнал}}{\text{Шум}} = \frac{\Delta T}{T_{\text{ш}}} \sqrt{\Delta \nu_{\text{HF}} \tau}$$

де: ΔT – температурний контраст; $T_{\text{ш}}$ – шумова температура; $\Delta \nu_{\text{HF}}$ – ширина смуги частот пропускання досліджуваного сигналу на вході вимірювальної системи (на високій частоті); τ – інтервал часу інтегрування сигналу після детектування, який для вимірювальної системи пасивної радіолокації по величині приблизно обернено пропорційний ширині смуги пропускання підсилювача (фільтру) сигналу після детектування

$$(\tau \approx \Delta \nu_{\text{LF}}^{-1}).$$

Радіометрична система, призначена для дистанційного вимірювання випромінювання природних об'єктів, включає наступні перетворювачі:

- фокусує систему для забезпечення просторової вибірковості випромінювання (звично дзеркальна антена або фазовані антенні решітки);
- перетворювач електромагнітного випромінювання в електричний сигнал (ЛБВ, параметричні підсилювачі, квантові парамагнітні підсилювачі);
- перетворювач для розпізнавання (виділення) сигналу вимірювальної інформації на фоні шумів;
- пристрій аналізу і відображення одержаної вимірювальної інформації про фізичні властивості об'єкту.

Розглянемо функціональні схеми деяких радіометричних приймачів.

Радіометр прямого посилення сигналу (рис. 6.2а) складається з антени, підсилювача високої частоти (ПВЧ), детектора (Д), підсилювача низької частоти (ПНЧ) і реєструючого пристрою (Р).

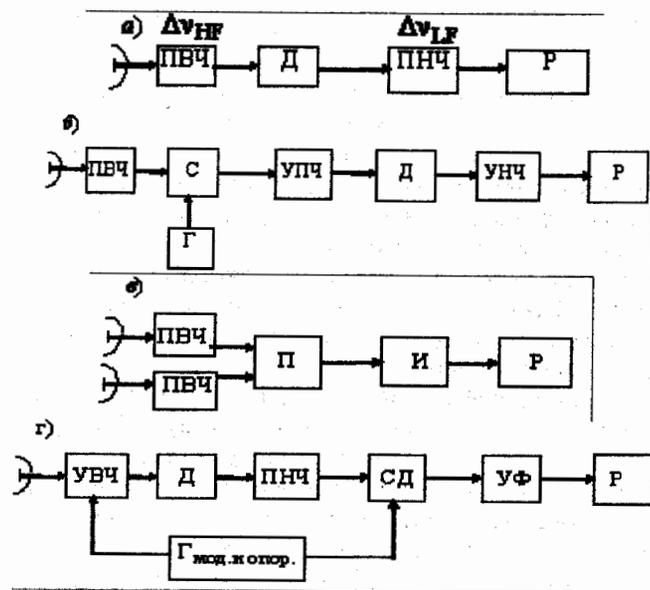


Рис. 6.2 – Структурні схеми радіометрів

З метою збільшення потужності поступаючого до радіометру сигналу

випромінювання смугу пропускання ПВЧ прагнуть зробити якнайширше (наскільки дозволяють умови задачі і технічні можливості). Якщо застосовується квадратичний детектор, то відношення сигнал/шум знижується. Стала часу радіометра при цьому пропорційно збільшується.

Варіант радіометру прямого посилення на рис. 6.2б відрізняється тим, що сигнал, який досліджується порівнюється (змішується) з стабільним сигналом генеруючого гетеродина (Γ) і далі посилюється на різницевій (проміжній) частоті в тракці УПЧ.

Принцип **кореляційного радіометра** (рис. 6.2в) полягає у тому, що досліджуваний сигнал пропускають по двох ідентичних каналах ВЧ і далі вимірюють коефіцієнт кореляції між складовими сигналів, що пройшли через них. Ці сигнали, що проходять по двох каналах ПВЧ, в одиницях температури радіоскрасовості представимо у вигляді

$$T = T_c + T_{ш1}, T' = T_c + T_{ш2},$$

де: $T_{ш1}$ та $T_{ш2}$ – власні шуми трактів.

Алгоритм кореляційного перетворення вивчаемого радіометричного сигналу

$$R = \frac{1}{\tau} \int T T' d\tau = \langle T_c^2 \rangle + \langle T_c (T_{ш1} + T_{ш2}) \rangle + \langle T_{ш1} T_{ш2} \rangle$$

де знак $\langle \rangle$ означає часове усереднювання. Перший доданок тут відповідає оптимальній процедурі обробки регулярного інформаційного сигналу T_c , інші містять знакозмінні шумові складові і є коефіцієнтами кореляції між статистично незалежними величинами. За умови, що час інтегрування (τ) перевершує характерні періоди шумових флуктуацій, середні (інтегральні) їх значення монотонно (у часі) прагнуть до нуля.

Таким чином, кореляційний радіометр в змозі відтворити температуру радіоскрасовості об'єкту з похибкою, значно меншою, ніж шумова температура. При такій процедурі шум пригнічується в тій частині, що носить нерегулярний характер.

У **модуляційному радіометрі** (рис. 6.2г) досліджуваному сигналу за допомогою генератора модулюючої і опорної напруг ($\Gamma_{\text{мод}}$ і $\Gamma_{\text{опор}}$) додають ознаку, що відрізняє його від власних шумів приймача, наприклад, строго періодичність. Власні шуми вимірювального тракту такої модуляції не піддаються. Завдяки цьому з'являються відмінності в спектрах сигналу і шумів. Застосовуючи потім селекцію за допомогою підсилювача низької частоти (ПНЧ), синхродетектора (СД) і вузькосмугового фільтру (ВФ), пригнічують шуми і нестабільність посилення вимірювальної системи. Ефективність такого радіометра гірше інших розглянутих, оскільки антена виявляється підключеною до входу ПВЧ лише протягом половини часу дії сигналу і, відповідно, приймається лише половина поступаючої на антену

радіотеплової енергії.

6.3 Дослідження навколишнього середовища за допомогою радіометрів

Для отримання метеорологічної інформації може використовуватися радіотеплокаційна апаратура, розташована на поверхні Землі.

З її допомогою можуть бути визначені:

- загальний вологовміст атмосфери і водозапас хмар та опадів,
- вертикальні профілі вологості і температури атмосфери.

Для **визначення температури водної** поверхні використовується вимірювання радіотеплового випромінювання на $\lambda = 3$ см і більше, для якого атмосфера і хмари практично прозорі, а інтенсивність випромінювання залежить тільки від характеру підстильної поверхні і її температури.

Для **визначення загального вологовмісту** атмосфери використовується лінія поглинання водяної пари поблизу $\lambda = 1,35$ см, де існує найбільше максимальне її власне випромінювання.

Оцінку водозапасу хмар виконують звичайно на $\lambda = 0,8$ см, де існують великі контрасти температур радіоскрасовості в порівнянні з сантиметровим діапазоном.

Відновлення профілю вологості безхмарної атмосфери за допомогою радіотеплокаціатора, встановленого на земній поверхні. Відновлення вертикальних профілів температури і водяної пари в атмосфері засноване на використуванні резонансного поглинання водяної пари і кисню в ПНЧ-діапазоні хвиль.

В даний час можливо відновлення профілю вологості в атмосфері, коли профіль температури вже завчасно отриманий іншими методами, наприклад, за середніми кліматичними даними. Так, на рис. 6.3 представлений вертикальний профіль вологості атмосфери, відновлений за наслідками радіотеплових вимірів у області резонансного поглинання водяної пари з $\lambda = 1,35$ см.

Тут же для порівняння приведений профіль вологості, зміряний радіозондом). Точність відновлення профілю вологості може бути істотно підвищена, якщо використовувати інформацію про приземну вологість (рис. 6.3б).

Відновлення профілю температури безхмарної атмосфери. Задача відновлення профілю температури по своїй постановці аналогічна задачі відновлення профілю вологості, при цьому прийом радіотеплового випромінювання атмосфери проводиться в смугі поглинання кисню на довжині хвилі 0,5 сантиметри.

Відновлення профілю температури атмосфери за наслідками реальних радіотеплових вимірювань в смугі поглинання кисню на 3-5 довжинах

хвиль (рис. 6.4) показує, що середня квадратична помилка відновлення профілю температури складає 2-5 К.

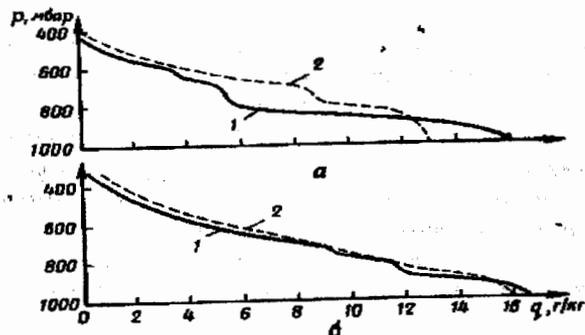


Рис. 6.3 – Вертикальний профіль вологості повітря за даними радіотеплового зондування:

а – без урахування приземної вологості, б – з урахуванням приземної вологості, 1 – вимірювання радіозондом, 2 – вимірювання радіометром

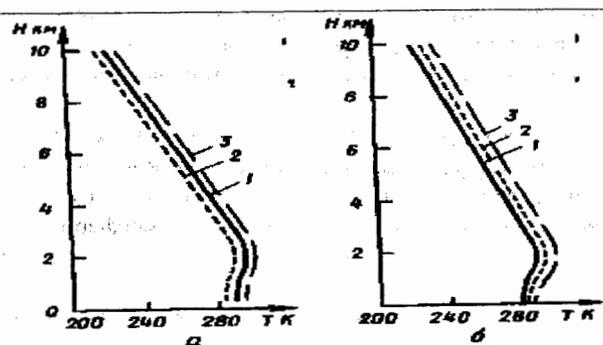


Рис. 6.4 – Вертикальний профіль температури атмосфери за даними радіотеплового зондування:

а – при зондуванні по трьох довжинах хвиль, б – при зондуванні по п'яти довжинах хвиль, 1 – вимірювання радіозондом, 2 – середній кліматичний профіль, 3 – вимірювання радіометром

Порівняння одержаних профілів (3) з результатами одночасних вимірювань температури за допомогою радіозондування (1) і середнім кліматичним профілем (2) показує, що відновлення температури по

радіотепловим вимірюванням краще відбиває її істинний хід, ніж відповідні середні кліматичні дані.

Теоретичні і експериментальні дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

- поглинання випромінювання у водяній парі і кисні сильно залежить від профілів метеорологічних параметрів атмосфери,
- мікрохвильові радіометри мають високу спектральну розрізняльну здатність,
- ці дві обставини і дозволяють поставити задачу про комплексне відновлення вертикальних профілів температури і вологості шляхом одночасного використання як слабких ($\lambda = 1,35$ см), так і сильних ($\lambda = 0,164$ см; $\lambda = 0,25$ см; $\lambda = 0,5$ см) резонансів для висот до 85-95 км.

Контрольні запитання

1. Характеристики радіотеплового випромінювання тіл
2. Залежність спектральної яскравості абсолютно чорного тіла від довжини хвилі в радіодіапазоні
3. Що таке яскравісна температура?
4. Що таке ефективна яскравісна температура?
5. Що таке антенна температура?
6. Як оцінюється випромінювальна здатність природних об'єктів?
7. Яким чином формується теплове випромінювання об'єктів?
8. Як відбувається радіотеплове випромінювання атмосфери?
9. Умови радіотеплового зондування хмар та опадів з поверхні Землі
10. Технічні засоби мікрохвильового зондування
11. Наведіть структурну схему радіометра
12. Поясніть можливість визначення вертикальних профілів вологості атмосфери за допомогою радіометрів
13. Поясніть можливість визначення вертикальних профілів температури атмосфери за допомогою радіометрів

7 Акустичне і радіоакустичне зондування навколишнього середовища

7.1 Акустичне зондування

Застосування акустики при дослідженнях навколишнього середовища почалися достатньо давно, проте можливості цих методів у

фізиці атмосфери поки використовуються не повною мірою і в першу чергу внаслідок невеликої дальності дії, обмеженої висотами до декількох кілометрів.

В якості властивостей використовуються:

- залежність швидкості звуку від температури;
- виникнення ефекту Доплера в результаті векторного складання швидкостей повітряних потоків і акустичного сигналу;
- залежність поглинання акустичного сигналу від вологості атмосфери;
- залежність поперечника розсіяння акустичного сигналу в атмосфері від інтенсивності флуктуацій вітру і температури;
- дифракція електромагнітних сигналів на діелектричних неоднорідностях, створених направленим в атмосферу достатньо потужним акустичним сигналом і т.д.

У таблиці 7.1 показано, в яких частотних діапазонах застосовується акустика в поточний час.

Таблиця 7.1 – Области застосування акустичних коливань

Область застосування		Частота, кГц						
		10 ⁰	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
Отримання інформації								
Дослідження фізичних явищ та складу речовини	газів			—————				
	рідини				—————			
	твердих тіл					—————		
Гідролокація				—————				
Ультразвукова дефектоскопія					—————			
Контроль рівнів, розмірів				—————				
Вплив на аерозолі				—————				
Акустичне та радіоакустичне зондування атмосфери				—————				
Дослідження цунамі					Інфразвук 10 ⁻¹ – 10 ⁻³			

Інформацію про стан середовища можна отримати, вимірюючи ступінь ослаблення акустичного сигналу, що пройшов фіксований шлях в цьому середовищі. Звичне ослаблення (загасання) монохроматичного сигналу, наприклад, для атмосфери, визначають натуральним показником

ослаблення $\mu_{\text{ак}}$, який залежить від довжини хвилі $\lambda_{\text{ак}}$ (частоти $\nu_{\text{ак}}$) звуку і властивостей атмосфери. Поглинання звуку в повітрі істотно залежить від частоти акустичного сигналу і від вологості повітря. Залежність максимуму ослаблення від вологості для широкого діапазону акустичних частот може бути представлена у вигляді

$$\nu_{\text{ак.макс}} = 0,79a_{\text{макс}}^2 + 1,47a_{\text{макс}} - 0,5,$$

де: $\nu_{\text{ак.макс}}$ – акустична широта (кГц), що відповідає максимуму ослаблення, $a_{\text{макс}}$ – абсолютна вологість повітря (г/м³), відповідна максимуму ослаблення.

Аналогічна залежність від температури виявляється складнішою.

При зондуванні атмосфери звичайно більш інформативним є не саме ослаблення сигналу, а його розсіяння в нижню півсферу, іноді – точно у зворотному напрямку. В цьому випадку, за умови, що немає глибоких температурних інверсій, а також туманів, низько розташованих хмар або аерозольних утворень, головним фактором в утворенні зворотного сигналу є атмосферна турбулентність.

Аналіз турбулентного розсіяння в атмосфері звукового сигналу з довжиною хвилі $\lambda_{\text{ак}}$ показує, що розсіяний сигнал є сумою двох складових: температурної, обумовленої температурними флуктуаціями, і вітрової, обумовленої флуктуаціями вітру. При цьому розсіяний сигнал в основному направлений в передню півсферу. Під кутом $\pi/2$ розсіяння не відбувається. У зворотному напрямку ($\varphi = \pi$) вітрові флуктуації не викликають розсіяння, працюють лише температурні флуктуації. Акустичне розсіяння неоднорідностями порівняно слабо залежить від довжини хвилі (частоти) акустичного сигналу.

Крім турбулентного розсіяння акустичного сигналу у області зустрічі з розсіюючим об'єктом, необхідно враховувати також поглинання. Це зокрема треба приймати до уваги як при аналізі даних, так і при виборі довжини хвилі локатора. Відзначимо також, що акустичний сигнал різко змінюється при появі серпанку, туману, хмарності, що використовується для його виявлення.

Акустичне зондування. Сонар. По аналогії з радіолокаторами (радарами) і оптичними локаторами (лідарами) акустичні локатори часто називаються сонарами.

На рис. 7.1 представлений принцип акустичного зондування, при якому прийом розсіяного акустичного сигналу здійснюється під деяким кутом до посланого сигналу або у зворотному напрямку. При цьому зондований сигнал може бути як імпульсним, так і безперервним.

Середній зсув частоти розсіяного сигналу служить мірою середньої швидкості потоку, а ширина частотного спектру зсуву – мірою його

турбулентності. Допплерівський зсув частоти, стосовно цього рисунка, дорівнює сумі зсувів по напрямках випромінювання і прийому:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta v_{\text{ак}}}{v_{\text{ак}}} &= \frac{V}{C_{\text{ак}}} [\cos(\varphi - \beta) + \cos(\pi - \beta)] = \\ &= \frac{V}{C_{\text{ак}}} [\cos(\varphi - \beta) + \cos \beta] \end{aligned}$$

де: $C_{\text{ак}}$ – швидкість поширення акустичних хвиль у середовищі; $\Delta v_{\text{ак}}$ – доплерівський зсув частоти; $v_{\text{ак}}$ – частота сигналу акустичного випромінювача; β – швидкість вітру; φ та $\pi - \beta$ – відповідні кути між напрямом сигналу, що випромінюється, і напрямом на приймач та швидкість руху вітру.

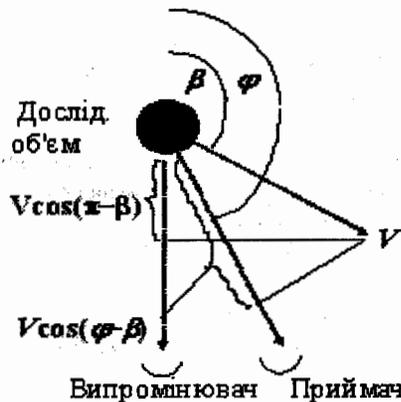


Рис. 7.1 – Принцип акустичного зондування

Зсув дорівнює нулю під кутом $\varphi = 0$ та максимально при $\varphi = \pi$, коли:

$$\frac{\Delta v_{\text{ак}}}{v_{\text{ак}}} = -2 \frac{V}{C_{\text{ак}}} \cos \beta$$

Таким чином, вимірявши доплерівський зсув частоти акустичного сигналу, можна визначити проекцію вектора швидкості вітру на деякий напрям, залежний від кута φ , який при зондуванні відомий, і кута β , який при зондуванні невідомий. Проте при використанні трьох приймальних антен, розташованих під різними кутами φ , можна визначати і модуль швидкості потоку, і його напрям.

При поєднанні передаючої і приймальної антен (моностатичний метод) по зміряному доплерівському зсуву частоти визначають складову

потoku у напрямі вісі діаграми направленості. Проте можна здійснити шестореве сканування по трьом складовим вектора потоку і приблизно відновити його повний вектор. Точніші результати можна одержати, використовуючи три синхронно працюючі акустичні локатори, що випромінюють і приймають сигнали під різними фіксованими кутами.

При поєднанні приймальної і передавальної антен можливий лише варіант імпульсно-акустичної локації, оскільки тільки в цьому випадку буде відома відстань до розсіюючого об'єму, виступаючого в ролі акустичної цілі.

У імпульсних некогерентних, а не в доплерівських акустичних локаторах можуть здійснюватися різні методи вимірювань. При вимірюванні лише зворотного сигналу при $\varphi = \pi$ можливі, наприклад, такі методи:

- 1) реєстрація розсіяного сигналу в період між двома послідовними імпульсами, що дає можливість отримання вертикального розподілу акустичної відбиваності,
- 2) розподіл за часом приходу сигналів, розсіяних на різних висотах, і спрямування їх по різним вимірювальним каналам. При цьому отримуємо часову динаміку вертикального профілю акустичної відбиваності. Міняючи нахил антени й азимут, можна одержати інформацію про горизонтальну складову вітру й інших характеристик середовища.

При рознесених антенах, коли можлива плавна зміна кута, під яким приймається розсіяний сигнал, з'являється можливість роздільного виміру температурних і вітрових неоднорідностей середовища, однак апаратура при цьому істотно ускладнюється.

Імпульсний акустичний локатор реагує на локальні температурні неоднорідності, тісно пов'язані із стійкістю середовища, що в інверсіях різко знижується, а при нестійкості атмосфери – різко зростає. Відомо, що спостереження інверсій – необхідний елемент попередження про наближення сильного забруднення атмосфери.

При акустичному зондуванні необхідно передбачати автоматичну компенсацію загасання сигналу по трасі його проходження до цілі у зв'язку з його розбіжністю і мати можливість одночасного виміру й доплерівського зрушення частоти, і амплітуди сигналу. Додатковою вимогою до акустичних випромінювачів може бути можливість плавної зміни частоти слідом за змінами параметрів середовища.

7.2 Радіоакустичне зондування

В основі даного методу лежить той факт, що швидкість поширення звуку в повітрі в основному залежить від температури T і швидкості вітру

в.

Визначення локальних значень T та \bar{v} відбувається за допомогою радіолокації звукової хвилі. Це можливе в силу того, що акустична хвиля, поширюючись у повітрі, модулює його густину ρ , отже, діелектричну проникність ϵ .

Існують методи визначення швидкості звуку за допомогою розсіювання радіохвиль на періодичній структурі ϵ , яка утворена акустичною хвилею в атмосфері. Строге вирішення такої задачі досить складне. Однак, при виконанні умови $\lambda \ll \lambda_{ак}$ (λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання) та прямим (або майже прямим) кутом між електромагнітним \vec{k} і акустичним \vec{q} векторами, відбувається дифракція світла під малими кутами до вектора \vec{k} . Виникають ефекти багаторазового розсіювання світлових хвиль, що приводять до появи дифракційних пучків багатьох порядків.

Із геометричних міркувань, коли акустична хвиля замінюється системою відбиваних площин, віддалених одна від одної на відстань $\lambda_{ак}$ при \vec{q} нормальних \vec{k} , напрямком на дифракційний максимум $\pm m$ -го порядку визначається з умови

$$\sin \vartheta_m = \pm m \lambda / \lambda_{ак}$$

Для можливості спостереження дифракційної картини вдалині за звуковим пучком з поперечним розміром l , необхідно, щоб дифракція усередині самого шару була незначною й вплив звукового пучка на світлову хвилю викликав лише періодичну фазову модуляцію хвильового фронту. Математично ця умова має вигляд

$$\sqrt{\lambda l} \ll \lambda_{ак}$$

Зовсім інший характер носить розсіювання електромагнітних хвиль на звуці, коли довжина хвилі λ порівнянна з $\lambda_{ак}$, а напрямком хвильових векторів \vec{q} і \vec{k} збігається або близький. Цей випадок, часто називаний дифракцією Брегга, характерний тим, що пучок світла практично без втрат потужності проходить у прямому напрямку, а розсіяне випромінювання має тільки один чітко виражений порядок у дзеркальному напрямку (рис. 7.2).

Спрощено можна уявити, що світловий промінь 1 частково відбивається від плоскої структури синусоїдально промодульованою звуком густини середовища. При цьому він утворює крім основного променя, що проходить, систему вторинних паралельних променів $1', 1'', 1'''$. Дворазовим відбиттям можна зневажити у зв'язку з великою втратою енергії при кожному акті відбиття. Ці відбиті промені виявляться у фазі, якщо кут ковзання ϑ задовольняє умові:

$$\vartheta = \vartheta_B = \arcsin(\lambda / 2\lambda_{ак})$$

оскільки різниця ходу в цьому випадку між ними дорівнює довжині електромагнітної хвилі. Якщо ця хвиля падає на звукову під кутом ϑ_B , який випадково називається «брегівським», то відбувається синфазне додавання хвиль, відбитих різними площинами й сусідніми ділянками однієї площини. Таким чином, у дзеркальному напрямку буде спостерігатися резонансний максимум розсіювання поля. Кут ψ між напрямками вхідної й відбитої хвиль дорівнює $2\vartheta_B$.

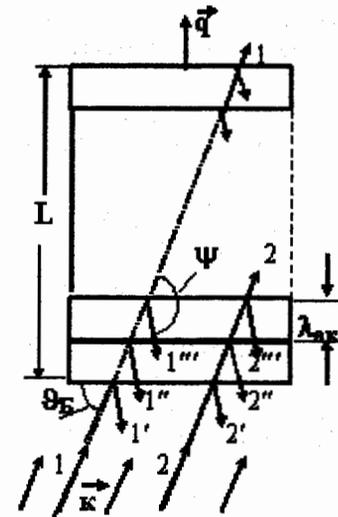


Рис. 7.2 – Дифракція Брегга

Система радіоакустичного зондування (РАЗ). В основі ідеї радіоакустичного зондування лежить дифракція брегівського типу. Рівень розсіяного сигналу, достатній для прийому, досягається підбором відповідного до умови Брегга співвідношення між довжинами хвиль λ , $\lambda_{ак}$ і кутом ковзання ϑ :

$$2\lambda_{ак} \sin \vartheta = \lambda$$

В літературі цей вираз іноді називається «умова синхронізму», проте, мова йде про просторову когерентність електромагнітної й звукової хвиль.

Конструктивно необхідне використання достатньо довгих звукових хвиль для одержання необхідного рівня сигналу.

У сучасних системах радіоакустичного зондування використовуються

акустичні хвилі з довжиною хвилі в десятки сантиметрів і відповідно радіохвилі дециметрового й метрового діапазонів.

Звуковий пакет рухається в атмосфері з швидкістю $C_{ак}$. Саме через велике розходження у швидкостях електромагнітної й акустичної хвиль з'являється можливість одержувати як би миттєві „фотографії” звукового пучка на тій або іншій висоті.

Частота розсіяного сигналу виявляється зсунутою щодо випроміненої частоти ω_0 на доплерівські зрушення Ω_D :

$$\omega_R = \omega_0 - 2\omega_0 \frac{C_{ак}}{c} \sin \vartheta = \omega_0 - \Omega_D$$

Ця обставина є надзвичайно важлива і містить в собі можливість дистанційного визначення величини $C_{ак}$ і, отже, комбінації температури T і швидкості вітру \vec{V} .

Якщо умова Брегга виконана (а це є необхідною умовою для отримання помітного рівня сигналу) і напрямок розповсюдження радіо і акустичної хвиль співпадають ($\vartheta = \pi/2$), то

$$\Omega_D = \frac{2\pi}{\lambda_{ак}} C_{ак} = \Omega_{ак}$$

тобто доплерівський зсув частоти в точності співпадає з частотою акустичного сигналу.

Розглянемо основні можливості реалізації методу РАЗ для визначення температури і швидкості вітру в атмосфері.

Для локалізації висоти H , на якій визначається швидкість звуку, зручно використовувати імпульсний акустичний сигнал. При цьому

$$H = C_{ак} t,$$

де: t – час від початку поширення імпульсу, $C_{ак}$ – швидкість звуку на рівні Землі.

Акустичні імпульси мають високочастотне заповнення, причому просторова протяжність імпульсу $L = \lambda_{ак} N$ визначає просторове розрізнення системи ΔH .

Електромагнітний сигнал може бути безперервним, а сам процес локації звукового пакету здійснюється по бістатичній схемі (рис. 7.3). Передавальна і приймальна антени розташовуються симетрично щодо звукового джерела в безпосередній близькості від нього. Ширину діаграм направленості всіх антен вибирають однаковою для кращого перекриття взаємодіючих хвиль. Починаючи з деякої висоти діаграми направленості практично перекриваються і схема працює як моностатична, але на малих висотах перекриття не відбувається і існує „мертва зона”.

При імпульсному радіовипромінюванні можливе також використання безперервного звукового випромінювання з лінійною

чистотною модуляцією.

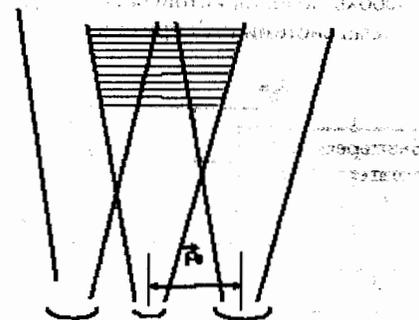


Рис. 7.3 – Принцип радіоакустичного зондування

особливістю методу РАЗ є те, що в дальній зоні акустичного випромінювача звукова хвиля, стаючи сферичною, утворює увігнуте відбивне дзеркало. Завдяки цьому інтенсивність розсіяної радіохвилі убиває з відстані r пропорційно $1/r^2$, а не $1/r^4$, як у разі відбиття від дифузної цілі.

Числові оцінки показують, що необхідне співвідношення сигнал/шум при радіоакустичному зондуванні на 30–60 дБ менше, ніж необхідна величина співвідношення для радіолокатора, використовуваного для зондування турбулентності атмосфери („відбиття від ясного неба”).

Вибір частоти радіоакустичного зондування диктується компромісом між вимогами до дальності зондування, що зменшується з підвищенням частоти, і вимогами до розрізняльної здатності і прийнятними габаритами системи, які збільшуються з зменшенням частоти. Існуючі системи РАЗ сантиметрового діапазону мають дальність дії декілька метрів, дециметрового – декілька сотень метрів і метрового – до 3–5 км.

Для визначення температури повітря всі три антени прямують вертикально вгору. Вимірюючи доплерівські зсуви частоти на окремих інтервалах висот по мірі поширення акустичного імпульсу, можна одержати повний профіль швидкості звуку. При цьому швидкість звуку визначатиметься не тільки температурою, але і вертикальною складовою швидкості вітру. У конвективних умовах, а також в інверсійних шарах миттєві значення цієї складової можуть досягати $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, що еквівалентно зміні температури на $1,6^\circ\text{C}$.

Проте, при усереднюванні великого числа профілів, отриманих протягом декількох хвилин, визначають середнє значення температури в

кожній точці профілю.

Для одночасного вимірювання температури і повного вектора швидкості вітру необхідно використовувати чотири напрямки.

Структурна схема системи РАЗ приведена на рис. 7.4.

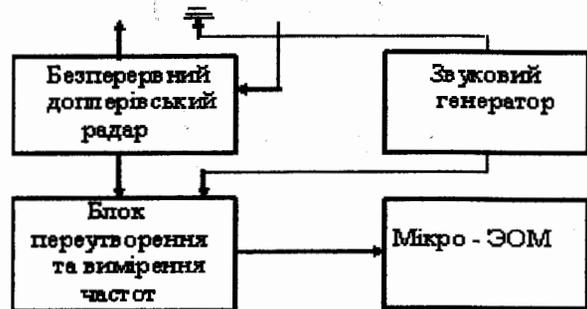


Рис. 7.5 – Структурна схема системи радіоакустичного зондування

Контрольні запитання

- 1 Властивості акустичних хвиль, що можуть використовуватися в якості метричних
- 2 Охарактеризуйте вплив вологості повітря на ступінь послаблення акустичного сигналу
- 3 Поясніть принцип акустичного зондування
- 4 Фізичні основи радіоакустичного зондування
- 5 Що таке дифракція Брегга?
- 6 Вибір довжин хвиль у системах радіоакустичного зондування
- 7 В чому полягає особливість методу РАЗ
- 8 Опишіть структурну схему системи РАЗ

8 Аерологічне зондування

8.1 Предмет, задачі і зміст аерології

Атмосфера – повітряна оболонка нашої планети, є *предметом науки метеорології*, яка вивчає атмосферні процеси у всьому їх різноманітті, взаємодію атмосфери з гідросферою і літосферою (поверхнею землі),

досліджує причини виникнення різних атмосферних явищ з метою що розробки методів їх прогнозування.

Дослідження атмосфери на різних висотах були початі одночасно з появою літальних апаратів. У зв'язку з інтенсивним розвитком техніки в ХХ ст. метеорологія розвивалася дуже швидко і зараз вона складається з ряду самостійних дисциплін, предметом вивчення яких є різні фізичні процеси і явища в атмосфері, а також методи їх вивчення. Головними серед них є фізика атмосфери, синоптична метеорологія, динамічна метеорологія і кліматологія, аерологія і ін.

У ряді перерахованих вище дисциплін аерологія займає особливе місце. *Предметом вивчення аерології* є фізичні процеси, що відбуваються у вільній атмосфері, і методи їх вивчення. Під вільною атмосферою розуміється та частина атмосфери, яка розташовується вище за прикордонний шар (шар тертя); тобто шар атмосфери, на який не розповсюджується безпосередній вплив поверхні землі. Прикордонний шар атмосфери – порівняно тонкий її нижній шар, в якому на розвиток процесів і рух повітря безпосередньо впливають орографічні і термічні неоднорідності земної поверхні.

Товщина прикордонного шару збільшується з зростанням шорсткості підстильної поверхні (збільшенням розміру нерівностей на шляху потоку повітря) і з посиленням вітру. В середньому вона близька до 1000 м і змінюється від 300 – 400 (над морем) до 1500 – 2000 м (над горами, ділянками, що покриваються горбами, і зонами міської забудови).

Аерологія виділилася в окремий розділ метеорології завдяки появі літальних апаратів, а також розвитку радіозв'язку і вимірювальної техніки. Основні *задачі сучасної аерології* полягають в проведенні зондування атмосфери, в створенні методів і способів дослідження вільної атмосфери, а також в розробці нових точніших приладів для вимірювання різних параметрів вільної атмосфери. Інформація про стан атмосфери на різних висотах потрібна для розширення і поглиблення сучасних знань про закономірності фізичних процесів, що протікають в різних шарах атмосфери, а також для вдосконалення методів прогнозування атмосферних процесів.

Основним методом аерологічних досліджень є зондування, тобто вимірювання різних метеорологічних величин за допомогою приладів, що піднімаються в атмосферу. В першу чергу це вимірювання швидкості і напрямку вітру, тиску, температури і вологості (їх також називають ще стандартними параметрами), потім інших фізичних величин, а також нивозового і аерозольного складу повітря.

Вимірювання вітру називають вітровим зондуванням, а вимірювання вітру одночасно з температурою і вологістю – температурно-вітровим зондуванням (рідше температурно-вологістно-вітровим зондуванням).

Вимірювання за допомогою радіозондів називають радіозондуванням, за допомогою апаратури, що піднімається на літаках, – літаковим зондуванням, на аеростатах – аеростатним зондуванням; використовується також ракетне і супутникове зондування. Все це, як правило, вертикальні зондування (точніше – нахилені вздовж вітру). На їх основі будуються вертикальні профілі атмосферних параметрів, тобто розподіли їх значень по висотам. Розрізняють також горизонтальне зондування – вимірювання, які виконані на одному рівні за допомогою літаків-лабораторій або урівноважених куль, наповнених воднем або гелієм – трансозондів, які забезпечують тривалий дрейф апаратури на різних висотах. Вимірювання додаткових характеристик стану атмосфери – мікроструктури хмар, радіації, озону, атмосферної електрики і ін., називають спеціальним зондуванням. Ці різноманітні види аерологічного зондування визначають **зміст сучасної аерології**.

Коротка історична довідка про зміст аерологічних досліджень. У 1647 р. француз Пер'є за допомогою ртутного барометра, піднятого на гору Пюї-де-Дом, встановив факт зменшення тиску з висотою. Це було перше аерологічне вимірювання.

В 18 столітті дослідження атмосфери вже не обмежувалося приземними шарами. Цікаві спостереження за полярними сьйвами були виконані М.В. Ломоносовим. Результати цих спостережень не втратили свого значення до наших днів.

Дослідження вільної атмосфери почалися з польотів людей на **повітряних кулях** приблизно з середини 18 століття. З 1940 р. **вільні аеростати** (рис. 8.1) вельми широко використовувалися для спеціальних досліджень атмосфери в Центральній аерологічній обсерваторії (ЦАО). Проте вільні аеростати з відкритими гондолами мають серйозний недолік – обмежену висоту підйому. Ці аеростати звичайно підіймаються до висоти близько 5 км.

Аеростат, що підіймається в стратосферу до великих висот, називається **стратостатом**. Стратостати піднімаються до висоти 20 км і за їх допомогою виконується великий комплекс спостережень. Під час польотів на стратостатах вивчалися інтенсивність космічного проміння і сонячної радіації; бралися проби повітря; проводилися спостереження за оптичними і електричними явищами і ін.

Ідея виконання метеорологічних досліджень на кулях без людей привела до появи кулепілотних спостережень. **Кулею-пілотом** називається невелика куля, що наповнена воднем або гелієм і яка випускається у вільний політ. За допомогою куль-пілотів вимірюються швидкість і напрям вітру і визначається висота нижньої межі хмар. Перші випуски паперових куль-пілотів були виконані в 1806 р. російськими моряками під час кругосвітнього плавання під керівництвом І.Ф. Крузенштерна. Для

спостереження за кулями-пілотами з землі були сконструйовані спеціальні геодроліти.

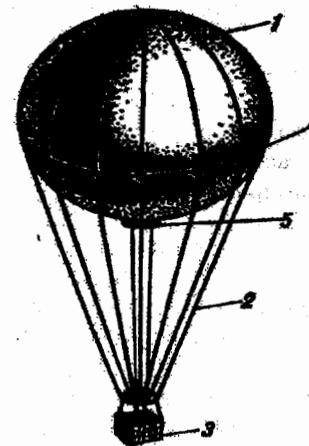


Рис. 8.1 – Аеростат

1 – оболонка, 2 – стропи, 3 – корзина, 4 – параболічний пояс, 5 – апендикс

Куля, що піднімає в атмосферу самописний прилад, назвали **кулею-шпидом**. Після його розриву метеорограф спускався на парашуті або допоміжній кулі. Метеорографи знаходили і повертали в обсерваторію за вказаною на ньому адресою. Завдяки цьому методу в 1902 р. французький вчений Тейсеран де Бір відкрив стратосферу.

Регулярні випуски куль-зондів в Росії виконувались з 1901 р. в Півлівській обсерваторії. Проте, при всіх своїх перевагах, метод куль-зондів мав ряд недоліків. Він непридатний в слабо населених або ненаселених районах. Крім того, результати обробки метеорограми можуть бути використані тільки після знаходження і повернення приладів, тому метеорографи непридатні для використання в оперативній роботі служби погоди. Цей метод незабаром був замінений зручнішим – **методом радіозондів**. В даний час метод куль-зондів використовується тільки при проведенні спеціальних досліджень, наприклад для вивчення космічного проміння, для взяття проб повітря і т.п.

В кінці 19 ст. за допомогою метеорографів у ряді країн виконувалися дослідження прикордонного шару атмосфери. Метеорографи підіймалися на **повітряних зміях** або **прив'язних аеростатах**. Середня висота підйому складала 1,5 – 2 км.

Зручніше проводити дослідження прикордонного шару атмосфери за

допомогою метеорографів на прив'язних аеростатах. Прив'язний аеростат має сигароподібну форму. Для стабілізації у польоті він забезпечується в хвостовій частині спеціальними стабілізуючими пристроями. Прив'язні аеростати дотепер є зручним засобом дослідження прикордонного шару атмосфери.

Після зародження авіації на зміну кулям-зондам і прив'язним аеростатам прийшли літаки. Літакове зондування в порівнянні з передуючими йому методами має немало переваг. На літаках разом з приладами підіймається також і спостерігач-бортаеролог, який істотно доповнює результати вимірювань візуальними спостереженнями за фізичними явищами на різних висотах. На літаках з'явилася можливість проводити різноманітні спостереження за хмарами (вимірювання вологості, інтенсивності обмерзання, фазового складу і мікроструктури хмар), а також отримувати дані про турбулентність і ін. Літаки досягали великих висот і менше залежали від погодних умов, ніж прив'язні аеростати і змії.

Метод літакового зондування дорогий та недостатньо оперативний, тому він не задовольняє вимогам масового застосування, оперативності і малій вартості і не може в цьому відношенні конкурувати з методом радіозондування.

В даний час літаки використовуються головним чином як літаючі лабораторії, оснащені великим комплексом апаратури для спостережень за станом атмосфери за спеціальними програмами.

Радіозонд – автоматичний фізичний прилад, який вимірює параметри стану повітря у міру підйому у вільній атмосфері і результати вимірювань передає по радіо на землю. Метеорологічні величини (температура повітря, тиск, вологість і ін.) при радіозондуванні вимірюються за допомогою чутливих елементів або датчиків. Швидкість і напрям вітру на різних висотах визначаються по координатам радіозонда, які отримують, спостерігаючи за ним в оптичний теодоліт або супроводжуючи його за допомогою радіотеодоліта або радіолокатора.

Винахідником радіозонда і методу його використання для дослідження атмосфери є радянський вчений-аеролог П.А. Молчанов. Він запропонував прилад, подібний зондному метеорографу з передавачем, що не записує свої дані, а передає їх у вигляді радіосигналів на землю. Таким чином, дані зондування могли бути одержані негайно і незалежно від подальшої долі приладу. Перший в світі успішний запуск радіозонда був здійснений П.А. Молчановим 30 січня 1930 року. Після розшифровки прийнятих сигналів результати зразу ж були передані до Москви в Центральний інститут прогнозів. Це було перше в світі оперативне аерологічне повідомлення. Радіозонд був першою *лінією радіотелеметрії*, за принципом якої в даний час здійснюється передача даних

метеорологічних, геофізичних і космічних ракет та штучних супутників.

Стало можливим регулярно одержувати повні дані температурно-вітрового зондування незалежно від стану погоди. За наслідками цієї роботи була надалі створена перша в світі *мережа радіовітрових спостережень*.

У 1955 р. в СРСР була створена *система радіозондування* на базі радіотеодоліта „Малахіт” і радіозонда А-22. В кінці 50-х років з'явилася принципово нова система зондування „Метеорит-РКЗ”, в якій реалізований метод вторинної радіолокації (з активною відповіддю) для вимірювання похилої дальності і організований суміщений радіоканал для передачі телеметричної інформації і вимірювання координат радіозонда. Супровід радіозонда по кутовим координатам, прийом і реєстрація сигналів здійснюються автоматично. Це відкрило широкі можливості для безперервного вдосконалення системи зондування. Модернізована радіометеорологічна станція (РМС) „Метеорит-2” забезпечує дальність прийому сигналів радіозонда на відстані до 300 км. В даний час на мережі експлуатується нова аерологічна система „Титан” або аерологічний обчислювальний комплекс АВК-1. Він забезпечує повну автоматизацію прийому і обробки сигналів радіозонда аж до видачі аерологічних повідомлень.

Роботи у області *метеорологічної радіолокації* направлені на розробку технічних засобів, що забезпечують розширення об'єму і підвищення якості інформації, одержуваної за допомогою МРЛС. Розроблені радіолокаційний метод виявлення зон турбулентності в хмарах і опадах, а також методи оцінки градобезпеки хмар і вимірювання опадів на великих площах. Техніка радіолокації широко використовується для радіометеорологічних вимірювань на літаках-лабораторіях.

Розвиток ракетної і космічної техніки дозволив розповсюдити аерологічні дослідження на верхню атмосферу і проводити *ракетні дослідження*. Вивчаються властивості верхньої атмосфери, її склад і космічне проміння з використанням потужних геофізичних ракет, що підіймаються на висоті більше 100–150 км. Також вивчення атмосфери здійснюється за допомогою так званих метеорологічних ракет, що підіймаються до висот 65–100 км і є поворотними. Спуск на полігон, як апаратури, так і рухомої установки дав можливість збільшити кількість запусків ракет. Ракета дозволяє вимірювати температуру за допомогою термометра опору, тиск – за допомогою манометра; вітер визначається по дослідженню дрейфу парашута. В результаті запусків ракет МР-1 були одержані перші дані про температуру, густину і вітер на висоті більше 50 км.

У 1960-х роках для дослідження атмосфери почали використовуватися *штучні супутники Землі* (ШСЗ). Зараз ШСЗ широко використовуються

як джерела глобальної інформації про стан атмосфери, хмарності, океанічної поверхні і поверхні суші.

Дослідження метеорологічних об'єктів в атмосфері може здійснюватися і за допомогою оптичних систем. Найперспективнішими з останніх є *лазерні локатори* (лідари). Такі системи дають можливість одержувати при зондуванні практично миттєві розрізи атмосфери і, таким чином, простежувати швидкі зміни досліджуваних параметрів. З середини 1960-х років почав швидко розвиватися новий перспективний метод дослідження атмосфери – лазерна локація.

8.2 Методи досліджень вільної атмосфери

Методи досліджень атмосфери можна умовно розділити на прямі і непрямі методи. Непрямі методи в свою чергу підрозділяються на активні і пасивні.

Прямі методи досліджень, іноді звані контактними, засновані на застосуванні приладів, що піднімаються безпосередньо на ту висоту, на якій потрібно зробити вимірювання за допомогою різних засобів.

Радіозондами різної конструкції здійснюються вимірювання температури, вологості і тиску повітря, швидкості і напрямку вітру, озону, потоків радіації і ін. Розрізняється мережеве або стандартне радіозондування (тільки температурно-вітрове) і спеціальне (озонове, актинометричне і ін.). Середня висота радіозондування складає 30–35 км, максимальна – до 40–45 км. Радіозондування є найбільш широко і регулярно використаним методом вивчення нижнього 30-кілометрового шару атмосфери.

У різних країнах створена спеціальна мережа пунктів радіозондування, на кожному з яких підйому приладів здійснюються щодня в певний час 1–4 рази на добу. Досліджується склад атмосфери, її температура, тиск і щільність, характеристики космічного проміння, ультрафіолетове, рентгенівське і корпускулярне випромінювання Сонця, земне магнітне поле, параметри іоносфери і інші явища.

Швидкість і напрямок вітру визначаються за допомогою оптичного або радіолокаційного дослідження за рухом кулі або яких-небудь спеціальних предметів або речовин, що викидаються для цієї цілі з ракет. Рухомий предмет є показником руху повітря (трасером).

Склад атмосфери на висотах до 100 км, досліджується шляхом забору проб повітря за допомогою спеціальних балонів, що піднімаються на відповідні висоти, і подальшого їх хімічного аналізу в лабораторії. Для вивчення складу атмосфери, яка перевищує 100 км за допомогою ракет і штучних супутників Землі використовуються прилади, звані мас-спектрометрами.

Непрямі методи (або дистанційні) дозволяють вивчати явища, що відбуваються в атмосфері на відстані.

Активні непрямі методи дослідження використовують випромінювання в атмосферу різних сигналів із Землі або з якого-небудь літального апарату. Звукові сигнали – акустичний метод, світлові сигнали прожекторний і лазерний методи, радіосигнали – метеорологічна радіолокація. За допомогою спеціальної приймальної апаратури реєструються і вивчаються відображені різними атмосферними об'єктами сигнали, характер яких і дозволяє судити про стан атмосфери.

Пасивні непрямі методи засновані на спостереженнях за характером протікання різних процесів і явищ в атмосфері. До таких явищ відносяться метеори, полярні сяйва, свічення нічного неба, сріблясті хмари, зміни яскравості неба під час сутінків і ін.

8.3 Методи вимірювання швидкості та напрямку вітру

Визначення параметрів вітру є однією з головних задач аерологічних вимірювань. Для вимірювання швидкості і напрямку вітру у вільній атмосфері можуть бути використані два методи.

Перший метод полягає в спостереженні із земної поверхні за переміщенням об'єктів, які вільно захоплені повітряними потоками і переміщуються з швидкостями цих потоків. Перший метод припускає використання засобів, що випускаються у вільний політ, вага яких менше ваги повітря.

Другий метод полягає у вимірюванні тиску повітряного потоку на нерухоме тіло. При другому методі вимірювальні прилади повинні підійматися у вільну атмосферу за допомогою носіїв, швидкість переміщення яких в атмосфері відрізняється від швидкості повітряних потоків.

Отримання інформації про вітер у вільній атмосфері, засноване тільки на використанні природних об'єктів, носить випадковий характер, оскільки ці об'єкти утворюються в атмосфері епізодично і не на всіх висотах.

Для отримання інформації про вітер у всій товщі атмосфери або, принаймні, в її значній нижній частині необхідно використовувати такі штучні об'єкти, які б переміщалися не тільки в горизонтальному, але і у вертикальному напрямку. Такими об'єктами є кулі-пілоти, радіопілоти, радіозонди, вільні аеростати (автоматичні і ті, що підіймаються в атмосферу разом з людьми), а також метеорологічні ракети.

При використанні другого методу найчастіше застосовуються прив'язні носії, за допомогою яких вимірювальні прилади утримують якийсь час на заданій висоті. Так вимірюються середня швидкість і напрям вітру на різних висотах. Такі вимірювання називають

градієнтними.

У *реальних умовах* для отримання інформації про вітер частіше всього користуються *кулями-пілотами, радіопілотами і радіозондами*.

Визначення швидкості і напрямку вітру за допомогою кулі-пілота засноване на вимірюванні зміни координат кулі, випущеної у вільний політ в атмосферу, за певний інтервал часу. За переміщенням кулі-пілота із Землі стежать за допомогою аерологічних теодолітів.

Залежно від числа використаних теодолітів, розрізняють два способи кулепілотних вітрових вимірювань – *однопунктний і двопунктний (базисний)*.

При *однопунктних вимірюваннях* у вільний політ випускається куля-пілот з відомою вертикальною швидкістю, яку вважають постійною в часі по висоті. По часовим інтервалам між вимірюваннями координат кулі-пілота і по відомій вертикальній швидкості можуть бути розраховані середня швидкість вітру і його напрямок в шарі атмосфери. При однопунктних вимірюваннях кутові координати кулі-пілота, що переміщається в просторі, вимірюють за допомогою аерологічного теодоліта (рис. 8.2).

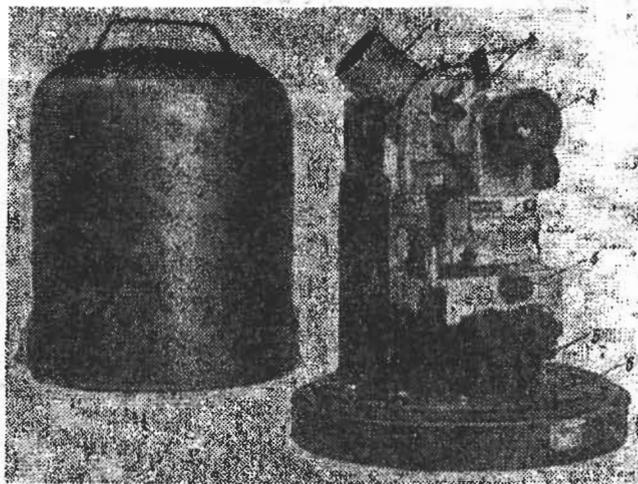


Рис. 8.2 – Теодоліт 2АШТ

1 – зорова труба, 2 – рукоятки переводу лімба, 3 – окуляр, 4 – затискний гвинт, 5 – підйомний гвинт, 6 – підставка

При цьому вимірюють азимутний (горизонтальний) і вертикальний кути (рис. 8.3).

Вертикальний кут β – це кут, укладений між лінією візування (лінією, що сполучає точку спостереження з кулею-пілотом) і її проекцією на горизонтальну площину (площину, дотичну до земної поверхні в точці розташування теодоліта).

Азимутний кут α знаходиться між напрямом північ – південь і проекцією лінії візування на горизонтальну площину.

Положення кулі-пілота розраховують методами тригонометрії.

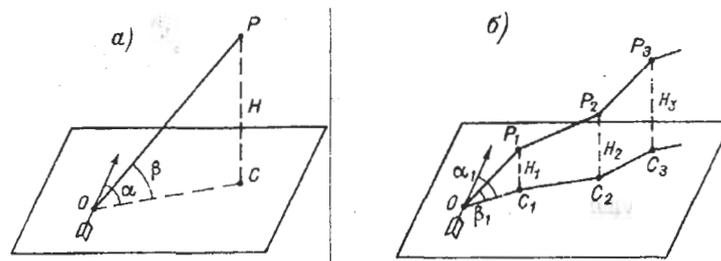


Рис. 8.3 – Однопунктні кулепілотні вимірювання
а – координати кулі-пілота; б – проекція переміщень кулі-пілота на горизонтальну площину

При *двopунктних вимірюваннях* немає необхідності в попередньому знанні вертикальної швидкості кулі-пілота. В цьому випадку середня швидкість вітру і його напрямок в шарі можуть бути визначені аналітично тільки за наслідками наземних теодолітних вимірювань координат кулі-пілота.

При двопунктних (базисних) вимірюваннях кутові координати кулі-пілота вимірюють за допомогою двох аерологічних теодолітів, віддалених один від одного на деяку відстань (базу) L (рис. 8.4). При цьому база в точці O_1 складає з напрямом північ – південь кут α_{61} , а в точці O_2 – кут α_{62} . Обидва кути для даної бази є величинами постійними і відомими наперед. Для вимірювання швидкості вітру в шарі базисним методом (при однакових висотах теодолітів) достатньо вимірювань двох горизонтальних кутів.

З метою забезпечення кращої видимості кулі-пілота оболонки фарбують в яскраві кольори, а найчастіше в чорний колір. Для поліпшення видимості кулі-пілота в темний час доби до нього підвішують спеціальне джерело світла (огарок свічки в паперовому ліхтарику або батарею з електричною лампочкою).

Одним з істотних недоліків кулепілотного способу є різке зниження його ефективності в темний час доби і в умовах низької хмарності. При малій висоті хмар куля-пілот через короткий час ховається в хмарах, і

подальше спостереження за ним стає неможливим. Для усунення цього недоліку необхідно переходити в таку ділянку спектру електромагнітних коливань, для якого аерозольна атмосфера прозора.

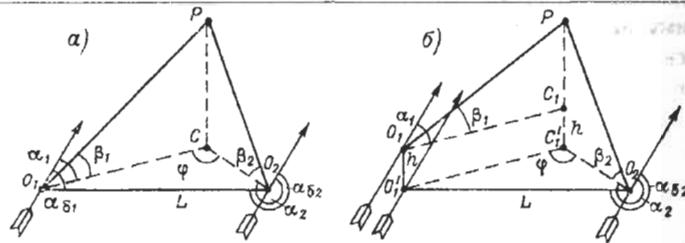


Рис. 8.4 – Двопунктні кулепілотні вимірювання
а – розташування теодолітів на однаковій висоті, б – розташування теодолітів на різних висотах

Радіопілотний спосіб вимірювання швидкості і напрямку вітру полягає у тому, що до кулі, що випускається у вільний політ, підвішується разом з джерелом живлення радіопередавач, який випромінює радіосигнали. Сукупність кулі і радіопередавачного пристрою називається **радіопілотом**. На пункті випуску за переміщенням радіопілота стежать за допомогою радіотеодоліта (рис. 8.5). Він є радіотехнічним пристроєм, призначеним для визначення кутових координат джерела радіосигналів в горизонтальній і у вертикальній площині.

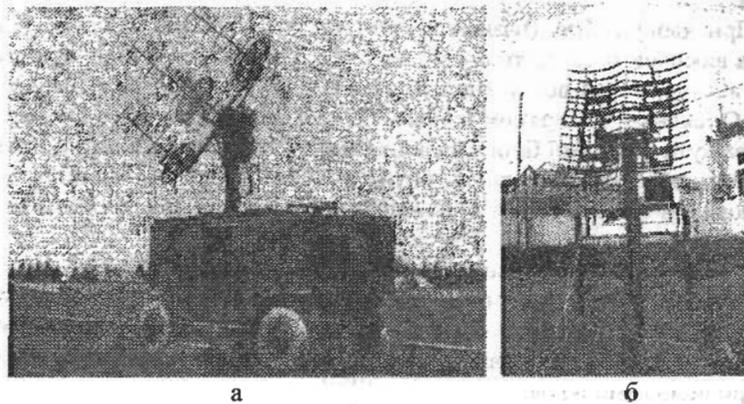


Рис. 8.5 – Радіотеодоліти „Малахіт” (а), „Радіотеодоліт-УЛ” (б)

З розвитком радіолокаційних методів вимірювань координат об'єктів з'явилася можливість відмовитися від використання закріплених до кулі радіопередавачів. Їх замінили пасивним відбивачем високочастотної енергії випромінюваної наземною радіолокаційною станцією (рис. 8.6). Як відбивачі в цьому випадку використовують ідеально провідні великі сфери або куточкові відбивачі.

При проведенні **радіозондування** атмосфери до кулі підвішується радіозонд, який є вимірювальним приладом та радіопередавач. Результати вимірювань по радіоканалу передаються на наземний пункт. Наземна апаратура системи радіозондування здійснює прийом інформації і одночасно визначає координати радіозонда у момент вимірювань радіотеодолітним або радіолокаційним способом. Результати вимірювань координат радіозонда використовуються для отримання даних про висоту і вітер.

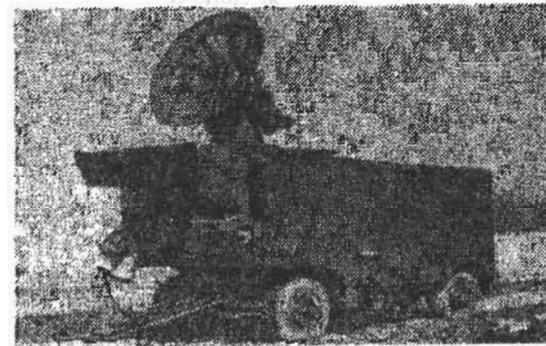


Рис. 8.6 – Радіолокаційна метеорологічна станція „Метеор”

Таблиця 8.1 – Координати, які вимірюються при різних методах вітрових спостережень

Методи спостережень	Координати			
	кутові		лінійні	
	азимут	кут міста	висота	нахильна дальність
Кулепілотні				
1. Однопунктні	+	+	—	—
2. Базисні	++	++	—	—
Радіовітрові				
1. Радіотеодоліт:				
а) з передавачем	+	+	—	—
б) з радіозондом	+	+	+	—

Методи спостережень	Координати			
	кутові		лінійні	
	азимут	кут міста	висота	нахильна дальність
в) з дальномірною приставкою	+	+	—	+
г) з дальномірною приставкою та радіозондом	+	+	+	+
2. Радіолокатор				
а) з куточковим відбивачем	+	+	—	+
б) з передавачем - відповідачем	+	+	—	+
в) з радіозондом	+	+	—	+

Вимірювання вітру за допомогою сигналів навігаційних станцій. У літературі існує назва – „навігаційний” вітер. Це означає, що вимірювання координат радіозонду вироблялося за допомогою системи навігаційних станцій. Цей метод призначений в основному для суден погоди.

Сутність методу при цьому залишається колишньою: по послідовних координатах кулі, що летить, будується горизонтальна проекція траєкторії. Окремі відрізки її характеризують напрямом і швидкістю вітру в різних шарах атмосфери. Спосіб визначення координат в даному випадку базується на вимірюваннях за допомогою системи навігаційних станцій, випромінюючих радіохвилі на наднизьких частотах. У США створена система радіозондування НЕВЕЙД (NAVAID), яка використовує сигнали навігаційних станцій „Омега”.

Передавачі навігаційної системи „Омега” працюють на частотах 10,2; 11,3 і 13,6 кГц. Внаслідок того, що радіохвилі низьких частот поширюються на дуже великі відстані, восьми станцій досить для того, щоб повністю охопити територію земної кулі і в будь-якому місці мати нагоду приймати сигнали не менше ніж від трьох передавальних станцій (рис. 8.7).

Визначення місцеположення радіозонда може здійснюватися за допомогою прийому та фазового порівняння сигналів від двох пар станцій. Кожна станція випромінює радіохвилю, яка поширюється вільно на всіх напрямках. Хвиля має строго визначені амплітуду і фазу коливань, які можуть бути зміряні в будь-якій точці простору. По різниці фаз сигналів, що приходять, можна з достатньою точністю визначити місцеположення радіозонда в будь-якій точці польоту (рис. 8.8).

Сигнали, випромінювані станціями системи „Омега”, передаються в певній послідовності, яка повторюється кожні 10 секунд. Кожна станція посилає щомить радіосигнали на вибраній частоті (наприклад, 13,6 кГц).

Радіозонд на частоті станцій системи „Омега” сприймає сигнали трьох станцій (А, В і С) і ретранслює ці сигнали на наземний приймач з

переносною частотою 403 МГц і модулюючою частотою від 10 до 200 Гц. Наземна (суднова) приймальна апаратура приймає телеметричні сигнали і розділяє їх на сигнали метеоданих і навігаційні сигнали. З приймача сигнали метеоканалу прямують на стрічку графічного реєстратора радіозонда і в обчислювач інформації. Після перетворення різниці фаз між вибраними станціями і визначення координат спеціалізована ПОМ обчислює швидкості і напрями вітру і видає їх на друк. Точність визначення координат радіозонда у великій мірі залежить від взаємного розташування радіозонда і передавальних навігаційних сигналів станцій.

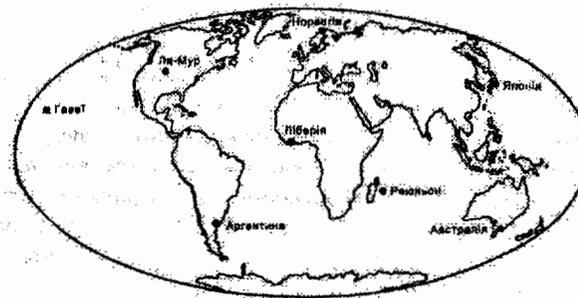


Рис. 8.7 – Розташування навігаційних станцій «Омега»

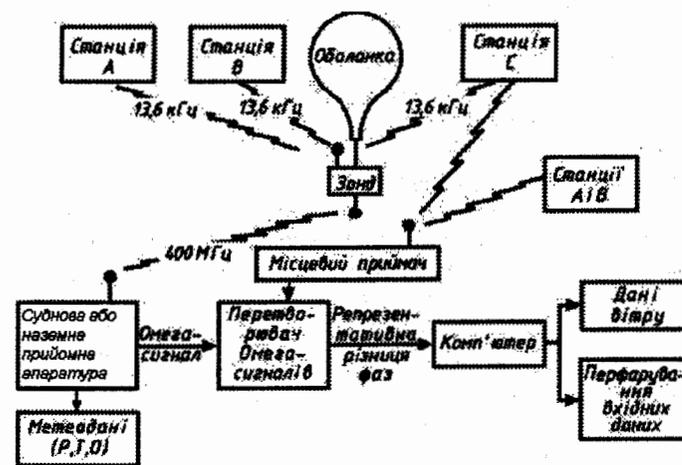


Рис. 8.8 – Навігаційна система зондування

У поточний час в основному використовуються різні модифікації системи КОРА (CORA) – МІКРОКОРА і ДіджіКОРА створені фірмою „Вайсала”.

Наземна навігаційна система „Омега” може замінюватися також космічними навігаційними системами НАВСТАР або ГЛОНАСС, причому принцип роботи радіозонда змінюється тільки в тому, що до складу апаратури радіозонда вводиться навігаційний приймач для визначення власних координат по супутниковим даним, і ці координати передаються разом з обміркованими метеорологічними елементами.

8.4 Устаткування для аерологічного зондування

Кулепілотні і радіозондові оболонки. Оболонки, вживані для куль-пілотів, повинні бути достатньо еластичними і мати малу газопроникність. Для виготовлення оболонок застосовується штучний каучук (латекс). Він має ряд переваг в порівнянні з натуральним каучуком: він менш горючий, більш стійкий по відношенню до органічних і мінеральних розчинників; у нього менша газопроникність. Сучасні оболонки виготовляються з хлоропренового латексу методом іонного відкладення. З метою забезпечення кращої видимості куль-пілотів в умовах хмарного неба оболонки деяких типів забарвлюються в чорний, червоний, оранжевий і інші яскраві кольори.

Залежно від призначення оболонки мають різні розміри і масу. Оболонки розділяють по номерах, які відповідають їх діаметрам в наповненому, але не роздутому стані. При вітровому зондуванні в основному використовуються оболонки номерів 10, 20 і 30. Оболонки номерів 10 і 20 застосовуються також для вимірювання висоти нижньої межі вигляду. Оболонки великих розмірів використовуються при радіозондуванні.

Експериментально встановлено, що при розриві товщина оболонки складає 0,005–0,01 мм, що відповідає граничній висоті підйому оболонок 35–40 км. Проте граничної висоти досягають далеко не всі оболонки. Найчастіше розрив оболонок відбувається на висоті 20–30 км. Причинами, що призводять до розриву, є: випадкові вкраплення в гуму твердих частинок, які при розтягуванні оболонки випадають, внаслідок чого утворюються свищі; руйнуюча дія ультрафіолетової радіації; руйнуюча дія озону, концентрація якого на висотах порядку 20 км в 200 разів більше, ніж у земної поверхні; низькі температури в стратосфері, які різко знижують пружність оболонок.

Натуральний каучук погіршує свої властивості під дією озону і ультрафіолетової радіації, але не втрачає еластичних властивостей при низькій температурі. Синтетичний каучук, навпаки, стійкий по

відношенню до ультрафіолетової радіації і озону, але втрачає свої еластичні властивості при низьких температурах. Тому для досягнення найбільших висот зондування переважно вдень користуватися оболонками з натурального каучуку, а вночі – з штучного.

Гази для наповнення оболонок. Для наповнення кулепілотних і радіозондових оболонок, як правило, використовується водень або гелій.

Водень є горючим газом, що не має ні кольору, ні запаху. Це найлегший зі всіх відомих газів. За нормальних умов (температура 0°C, тиск 1013,3 гПа) один кубічний метр водню важить 0,09 кг, що в 14,4 рази легше за повітря. Питома підйомна сила водню складає 1,203 кг/м³. При з'єднанні з повітрям або киснем водень горить, а в певній пропорції з повітрям (при домішці повітря до водню від 25 до 96 %) утворює гримучий газ, який вибухає від вогню або іскри.

Для наповнення кулепілотних і радіозондових оболонок чистий водень практично не застосовують внаслідок складності технології його отримання, а використовують технічний водень (що містить певний відсоток домішок). Питома підйомна сила його складає 1,100–1,150 кг/м³ при питомій вазі 0,130–0,195 кг/м³.

Технічний водень застосовується двох типів: компресійний водень, що доставляється на аерологічні станції в спеціальних балонах з заводів-виробників, де він, як правило, є побічним продуктом деяких виробництв; водень, який отриманий безпосередньо на аерологічній станції за допомогою спеціальних водневих газогенераторів.

Для доставки компресійного водню застосовують спеціальні балони, призначені тільки для зберігання і транспортування водню, які герметично закупорюються. У балоні знаходиться близько 40 літрів водню, що знаходиться під тиском $151,5 \cdot 10^5$ Па. При нормальному тиску укладений в балоні водень займає об'єм 5,0–5,5 м³. По своєму зовнішньому вигляду водневі балони не відрізняються від балонів, призначених для інших газів (кисню, гелію), але вони маркуються зеленим кольором. Крім того, вихідний штуцер вентиля водневого балона має ліве різьблення.

Для добування технічного водню безпосередньо на аерологічній станції в поточний час відомо декілька хімічних способів. Найбільше поширення набули силіколовий, алюмо-силіколовий, лужно-алюмінієвий і електролізний способи.

Гелій є інертним газом, який не вступає в хімічні з'єднання з жодними речовинами, не має отруйних властивостей, не горючий, не вибухонебезпечний, не впливає руйнівним чином на гуму і інші матеріали. Він майже в два рази важче за водень, його питома вага рівна 0,1785 кг/м³, а питома підйомна сила складає 1,1143 кг/м³.

Гелій є ідеальним газом для наповнення кулепілотних і радіозондових оболонок. Його одержують тільки в стаціонарних заводських умовах,

оскільки технологія отримання достатньо складна і дорога. Саме тому гелій використовується тільки там, де по міркуваннях техніки безпеки використання водню виключене, наприклад в корабельних умовах.

Гелій доставляють до місця використання в компресійному вигляді в спеціальних балонах, під тиском $151,5 \cdot 10^5$ Па. Балони фарбують в коричневий колір. Оскільки гелій – газ інертний, то для його зберігання і перевезення можуть бути використані кисневі балони. У одному балоні в стислому вигляді знаходиться до $5,5 \text{ м}^3$ гелію (за нормальних умов).

Газогенератори. Для отримання водню безпосередньо на аерологічних станціях використовують газогенератори. В даний час застосовуються газогенератори двох типів: високого і низького тиску. Газогенератор високого тиску являє собою стандартний водневий балон місткістю 45 л, пристосований для здобуття водню (рис. 8.9). В даний час на мережних аерологічних станціях для здобуття водню використовують газогенератори АВГ-45. За допомогою такого генератора одержують водень силікольовим і алюмо-силікольовим способами.

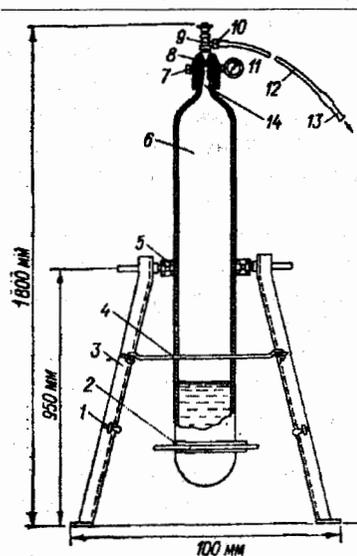


Рис. 8.9 – Балонний газогенератор АВГ-45

1 – гак складальний малий, 2 – обойма нижня з рукоятками, 3 – штатив, 4 – гак збірний великий, 5 – обойма верхня з напівсями, 6 – балон, 7 – запобіжний клапан, 8 – головка, 9 – вентиль, 10 – накидна гайка на наконечнику шланга, 11 – манометр, 12 – шланг, 13 – патрубок, 14 – горловина

Генератори низького тиску (рис. 8.10) реалізують лужно-алюмінієвий спосіб і застосовуються, як правило, в експедиційних умовах, на полярних станціях і в Антарктиді.

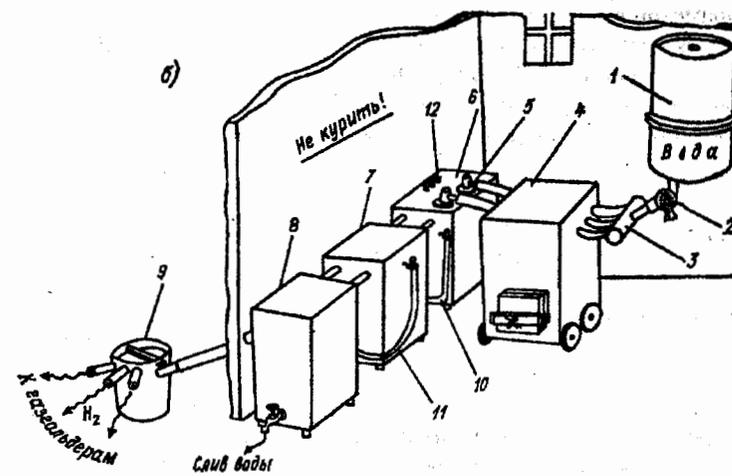
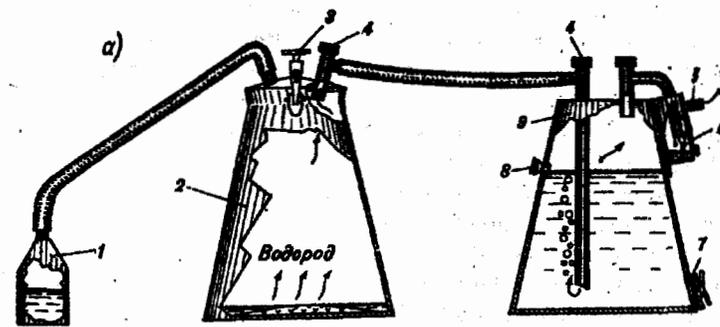


Рис. 8.10 – Газогенератори низького тиску Г-3 (а) і ВГ-76 (б)

а) 1 – бачок дозування, 2 – реактор, 3 – затискний гвинт, 4 – запобіжні клапани, 5 – патрубок для виходу водню в оболонку, 6 – відстійник, 7 – зливний отвір, 8 – контрольний отвір, 9 – холодильник
 б) 1 – бак для води, 2 – регулятор витрати води, 3 – роздільник води, 4 – реактор, 5 – стрижень холодильника, 6 і 7 – холодильники, 8 – осушувач, 9 – роздільник газу, 10 і 11 – шланги зливу води, 12 – запобіжний клапан

Контрольні запитання

- 1 Чому виникає необхідність досліджень атмосфери на різних висотах?
- 2 Поясніть термін „вільна атмосфера”
- 3 Що таке „прикордонний шар” атмосфери?
- 4 Охарактеризуйте основні задачі сучасної аерології
- 5 Зондування як основний метод аерологічних досліджень
- 6 Які існують способи та види зондування атмосфери та навколишнього середовища?
- 7 Призначення аеростатів, стратостатів, куль-пілотів
- 8 Переваги та недоліки куль-зондів
- 9 Характеристики методу літакового зондування
- 10 Призначення та особливості використання радіозондів
- 11 Поясніть, чому радіозонд був першою лінією телеметрії
- 12 Системи радіозондування „Малахіт” та „Метеорит-РКЗ” як приклади вдосконалення систем зондування
- 13 Охарактеризуйте прямі та непрямі методи дослідження атмосфери
- 14 Параметри вітру та методи їхнього вимірювання
- 15 Особливості проведення одно- та двопунктних вимірювань
- 16 Що таке радіопілот та радіозонд?
- 17 Вимоги та особливості використання оболонок
- 18 Чим заповнюють кулепілотні радіозондові оболонки?

9 Аерологічне радіозондування

9.1 Принципи радіозондування і класифікація систем радіозондування

Системи радіозондування призначені для дистанційного вимірювання метеорологічних елементів вільної атмосфери і являють собою сукупність радіотелеметричної та радіолокаційної систем.

Радіотелеметрична система призначена для вимірювання метеорологічних елементів та надсилання результатів на відстань за допомогою радіохвиль.

Радіолокаційну систему використовують для виміру координат вимірювального пристрою в мить вимірювання. Вимірювання метеорологічних елементів атмосфери та надсилання результатів здійснюються за допомогою радіозонда. Він являє собою сукупність відповідних вимірювальних перетворювачів та радіопередавача.

Положення радіозонду у просторі визначається трьома координатами, які залежать від використаної системи координат. Так, якщо використано

циліндричну систему, то такими координатами є кут в горизонтальній площині (азимутальний кут) α , кут місця β та висота H . При використанні сферичної системи координатами є азимутальний кут α , кут місця β та похила дальність R .

Розрізняють два типи систем радіозондування – радіопеленгаційні (радіотеодоліти), і радіолокаційні (радіолокаційні метеорологічні станції). В радіотеодолітах вимірюються лише кутові координати радіозондів, при цьому азимут α та кут місця β визначаються, як правило, методом порівняння (рівносигнальної зони), а третя координата – висота H – обчислюється по вимірюваному тиску. Прикладом системи зондування на основі радіотеодоліту є система „Малахіт”. В процесі експлуатації радіотеодоліт „Малахіт” був перероблений у радіолокаційну метеорологічну станцію шляхом введення в його склад дальномірної приставки.

В системах зондування на основі радіолокаційної станції використано сферичну систему координат, і всі три координати вимірюються радіолокаційним методом, а дальність – імпульсним методом з активним формуванням сигналу у відповідь.

Радіозонд, що призначений для використання в такій системі, взагалі, повинен мати два радіопередавача та один приймач: один передавач – для передачі телеметричної інформації, приймач – для прийому імпульсних сигналів запиту, інший передавач – для випромінювання сигналів на прийняті сигнали запиту. В сучасних радіолокаційних системах зондування функцію передавача радіотелеметричного каналу, приймача сигналів запиту та передавача сигналів відповіді виконує один прилад – надрегенеративний прийомопередавач. На цьому принципі збудована більшість систем зондування.

9.2 Система радіозондування „Малахіт”

Система „Малахіт” є першою мережевою вітчизняною системою комплексного температурно-вітрового зондування атмосфери, котра успішно використовувалася на аерологічній мережі. Перевагою цієї системи є простота технічної реалізації та задовільні експлуатаційні якості. По своєму початковому призначенню система „Малахіт” являла собою радіотеодоліт, призначений для зондування атмосфери зондом А-22-III спільно з радіопередавачами ПРБ-1,5, А-36 та А-43. Експлуатація радіотеодоліту виявила ряд його недоліків, з метою усунення яких радіотеодоліт „Малахіт” було перероблено в радіолокаційну метеорологічну станцію „Малахіт”.

В режимі радіотеодоліту система „Малахіт” мала наступні технічні характеристики:

- дальність дії не менше 100 км при висоті польоту радіозонда до 25–30 км;
- потужність пеленгованого радіопередавача не менше 0,1 Вт;
- діапазон хвиль метровий (довжина хвилі близько 1,5 м);
- середня частота сигналів 216 МГц;
- ширина діаграми направленості антенної системи на рівні половинної потужності 18° ;
- максимальна помилка у визначенні кутових координат радіозонда в обох площинах не більш $1,75^\circ$;
- вірогідна випадкова помилка вимірювання кутових координат радіозонда (у діапазоні вимірювання по азимуту від 0 до 360° і по куту місця від 16 до 75°) не більш $0,3^\circ$;
- чутливість приймального пристрою при відношенні сигнал–шум, рівному двом, не гірше $8 \cdot 10^{-6}$ Вт;
- потужність, споживана радіотеодолітом від джерела живлення при всіх включених блоках, не перевищує 1,5 кВт.

Працює радіотеодоліт „Малахіт” наступним чином. В процесі польоту радіозонду його передавач випромінює високочастотні сигнали з переносною частотою 216 МГц модульовані по амплітуді імпульсами з частотою суперизації. Останні, в свою чергу, модульовані по амплітуді вимірювальними сигналами температури, вологості та тиску імпульсним методом у відповідності з діючим законом кодування (по коду азбуки Морзе). При цьому кожному вимірюваному значенню метеорологічного елемента відповідають дві букви азбуки Морзе. По своїй структурі такі сигнали схожі з тонально модульованими телеграфними сигналами.

Радіоприймач здійснює прийом таких сигналів, і в процесі цього прийому за допомогою антенної системи та індикаторного пристрою здійснюється вимірювання кутових координат радіозонду. Антенну систему радіотеодоліту складено з чотирьох антен типу „хвильовий канал” (по дві антени на кожну з площин – горизонтальну та вертикальну), пристрою для фазування та антенного комутатора. Кожна пара антен формує діаграму направленості, котра за допомогою пристрою для фазування та комутатора періодично зміщується в просторі то до однієї антени, то до іншої, утворюючи рівносигнальну зону.

Індикатор кутових координат працює за схемою амплітудної відмітки пеленгу радіозонду. При цьому індикація пеленгу по азимуту та куту місця об'єднана на екрані однієї електронно-променевої трубки, де можна побачити в загальному випадку дві пари імпульсів різної амплітуди. Оператор обертанням штурвалів азимуту та кута місця безперервно повертає антену таким чином, щоб імпульси кожної пари мали однакові амплітуди. Це означає, що радіозонд точно знаходиться на

рівносигнальному напрямку та кутові положення антени точно відповідають напрямку на радіозонд, що пеленгується. Відлік кутового положення антени по азимуту та куту місця здійснюється по шкалам, котрі розташовано на осях сельсин-приймачів блоку точного відліку. Сельсин-приймачі електрично зв'язані з встановленими на відповідних осях антени сельсин-датчиками. По кожній з координат в блоці точного відліку є два приймача – перший приблизного відліку, що має точність до 2° і точного відліку, з точністю до $0,1^\circ$.

Роботою індикатора кутових координат керує низькочастотна секція антенного комутатора, що знаходиться на одній осі з його високочастотною секцією, котра керує перемиканням кутового положення діаграм направленості в кожній площині

Далекомірна приставка, що вбудована в теодоліт з метою перетворення його в РМС, призначена для формування та випромінювання у простір потужних радіочастотних імпульсів, спостереження імпульсів відповіді радіозонду та вимірювання похилої дальності до радіозонду. Приставка складається з антени, блоку індикатора, блоку далекоміра та інших допоміжних блоків.

Антенна далекомірної приставки призначена для випромінювання потужних радіочастотних імпульсів запиту та являє собою антену типу „хвильовий канал”, аналогічну одній з приймальних антен. Вона розташована у центрі квадрату, по кутах якого встановлено приймальні антени радіотеодоліту. Передавач приставки генерує високочастотні імпульси запиту з переносною частотою 216 МГц та частотою повторення 1070 Гц при тривалості імпульсів 2 мкс та імпульсній потужності не менш як 30 кВт. Надрегенеративний прийомопередавач радіозонду перевипромінює імпульс запиту, котрий приймається приймальними антенами радіотеодоліту.

На індикаторі приставки сигнал у відповідь проглядається у вигляді викиду над середнім рівнем сигналів суперизації з наступною паузою. Індикатор має електричні візирі, котрі в залежності від масштабу розгортки (грубої або точної) мають вид стробу або затіненої ділянки. За допомогою штурвалу механізму дальності світлові візирі на розгортках сполучаються з сигналом відповіді; при цьому на шкалі далекоміра відраховують похилу дальність до радіозонду. Послідовністю роботи усіх блоків далекомірної приставки керує синхронізатор, в котрому формуються імпульси частотою 75 кГц. Далі з цієї послідовності формуються імпульси запуску передавача, індикатора дальності, індикатора кутових координат та блокуючі імпульси для запирання приймача радіотеодоліту на час випромінювання передавача.

Блок індикатора забезпечує спостереження сигналу відповіді на грубій та точній розгортці та супроводження радіозонду по відстані.

У поточний час систему „Малахіт” використовують лише з далекомірною приставкою, як РМС.

9.3 Система радіозондування „Метеор” („Метеорит”)

Система радіозондування „Метеор” („Метеорит”) належить до другого покоління радіозондувальних пристроїв, що прийшли на зміну комплексу „Малахіт”. В цьому комплексі було враховано досвід проектування та експлуатації радіозондувального комплексу першого покоління. Порівняно з комплексом „Малахіт” система „Метеор” має більш високу точність вимірювання кутових координат радіозондів, що визначено переходом на більш короткий діапазон хвиль (дециметровий, довжина хвилі коло 17 см), більший максимальний радіус дії за рахунок підвищення потужності передавача та збільшення чутливості приймального пристрою, а також завдяки підвищенню напрямлених властивостей антенної системи. Крім того, в даній системі повністю автоматизовано процес вимірювання координат радіозонду та супроводу зонда по кутовим координатам та дальності, а також процес реєстрації радіотелеметричної та радіолокаційної інформації.

Слід вказати, що комплекс „Метеор” відрізняється від „Малахіту” також високим ступенем автоматизації керування. Ця система зондування випускалася промисловістю у двох варіантах: пересувному „Метеор” та стаціонарному „Метеорит”, котрі конструктивно не відрізнялися. Система може працювати в двох режимах: радіозонду та куточкового відбивача. В режимі радіозонду комплекс працює як система комплексного температурно-вітрового зондування. В режимі куточкового відбивача комплекс працює як система радіовітрових вимірювань при стеженні за зміною поточних координат куточкового відбивача, що закріплений на оболонці.

Система „Метеор” („Метеорит”) має наступні технічні характеристики:

- переносна частота (1728±8) МГц (що відповідає довжині хвилі біля 17 см),
- частота повторення імпульсів передавача 833 Гц,
- імпульсна потужність передавача 200 кВт,
- тривалість імпульсу передавача 0,8 мкс,
- чутливість приймальної системи $6,5 \cdot 10^{-13}$ Вт.

9.4 Система радіозондування АВК-1 („Титан”)

З 1986 р. на аерологічній мережі застосовується система зондування „ІБ27С-М – МР3-3А” – аерологічний інформаційно-обчислювальний

комплекс (АВК-1), до складу якого входять наземна радіолокаційна станція стеження за активною мішенню, апаратура передполітної перевірки технічних характеристик радіозондів, міні-ЕОМ і радіозонд МР3-3А.

За принципом дії ця система аналогічна системі „Метеорит” — МАРЗ, але є досконалішою технічно. Радіолокаційна станція виконана на сучасній елементній базі і оснащена міні-ЕОМ, яка забезпечує проведення вітрового або температурно-вітрового радіозондування атмосфери з повною автоматизацією прийому і обробки даних радіозондування з видачею аерологічної телеграми. Окрім цього, міні-ЕОМ забезпечує тестовий і функціональний контроль працездатності самої РМС.

Особливості АВК-1. У АВК-1 відсутній режим супроводу пасивних мішеней (куточкових відбивачів), що дозволило понизити потужність передавача, оскільки він працює тільки з активною мішенню. Функції НВЧ – генератора і малошумного параметричного підсилювача надвисокої частоти (НВЧ) виконує спеціальний електронно-променевий прилад – потенціалотрон. Для передачі телеметричного сигналу застосована частотна модуляція (замість амплітудної в радіозонді МАРЗ). Принцип модуляції сигналу передавача радіозонда по амплітуді і частоті показаний на рис. 9.1.

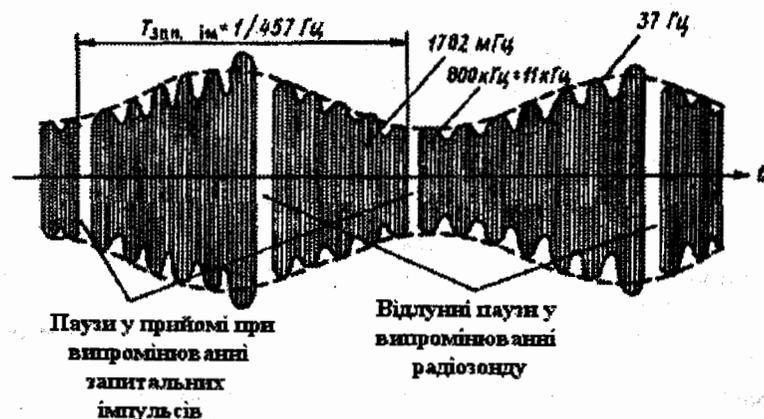


Рис. 9.1 – Принцип модуляції сигналу передавача радіозонда МР3-3А

Сигнал радіозонда є НВЧ – сигнал з переносною частотою 1782 МГц і модулюючими частотами, які є носіями телеметричної і радіолокаційної інформації.

Телеметрична інформація закладена в періоді проходження частотних

змін суперуючої частоти радіозонда $800 \text{ кГц} \pm 11 \text{ кГц}$, дальність до радіозонда визначається по часовому інтервалу між запитальними імпульсом і відлунною паузою в сигналі радіозонда, відлунні паузи утворюються при опроміненні радіозонду запитальними імпульсами, що слідує з частотою 457 Гц .

Інформацію про кутові відхилення радіозонда несе огинаюча 37 Гц , що виникає при скануванні діаграми направленості з частотою 37 Гц . По фазі і амплітуді огинаючої визначається величина і напрям відхилення радіозонда відносно електричної осі антени.

Завдяки введенню регулювання рівня випромінюваної потужності малопотужного передавача і застосуванню потенціалотрону в якості швидкодіючого антенного перемикача зменшена мінімальна дальність дії. Це забезпечує спроможність автосупроводу радіозонда по координатах безпосередньо із землі і усуває втрати інформації в приземному шарі.

Зниження потужності НВЧ – передавача дозволило зменшити розміри санітарно-захисної зони і, відповідно, шкідливу дію випромінювання РЛС.

Основні тактико-технічні дані комплексу АВК-1:

- діапазон переносних частот передавачів ($1775-1790$) МГц,
- частота повторення зондових імпульсів ($457,5 \pm 0,2$) Гц,
- імпульсна потужність магнетронного передавача (потужного/малопотужного) $25/1,5 \text{ кВт}$,
- тривалість випромінюваних імпульсів запитального сигналу (потужного/малопотужного) $1,1/0,5 \text{ мкс}$,
- чутливість приймальної системи 10^{-13} Вт ,
- діаметр дзеркала антени $1,83 \text{ м}$,
- ширина діаграми направленості по половинному спаду потужності $(6 \pm 1)^\circ$,
- дальність автоматичного супроводу радіозонда 300 км ,
- обробка результатів зондування автоматична (ЕОМ А-15А).

Автоматизація АВК-1 дозволяє прискорити обробку даних радіозондування і скоротити штат аерологічної станції. Частина А і В аерологічних телеграм видаються після проходження радіозондом рівня 100 гПа .

Загальний вид АВК-1 в робочому приміщенні показаний на рис. 9.2.

Комплекс містить системи: передавальну, антенно-фідерну, приймальну, відображення інформації, визначення координат, обробки і управління, управління антеною, автоматичного контролю і електроживлення.

У **передавальній системі** використовується потужний передавач для великих віддалень і малопотужний для дальності менше 3 км , їх перемикання здійснюється автоматично. Частота передавачів автоматично підстроюється на частоту максимальної чутливості радіозонда до

запитального імпульсу РЛС.

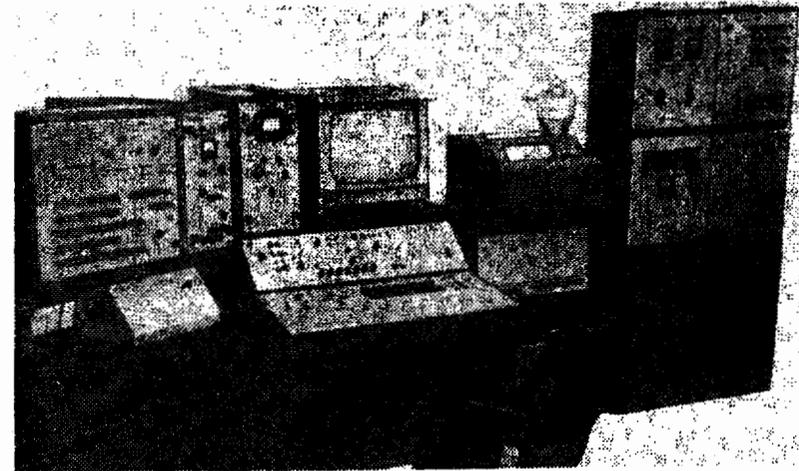


Рис. 9.2 – Загальний вигляд АВК-1

Для підвищення надійності прийому сигналу радіозонда в **антенній системі** передбачена кругова поляризація випромінюваною антеною електромагнітної енергії.

Приймальна система побудована по схемі супергетеродина з потрібним перетворенням частоти. У ній застосовані автоматичне і ручне підстроювання частоти гетеродина НВЧ, автоматичне і ручне регулювання посилення каскадів проміжних частот. Перша проміжна частота 100 МГц вибрана для забезпечення вибіркості по дзеркальному каналу. Друга проміжна частота 30 МГц забезпечує умови отримання оптимальної смуги пропускання, зв'язаної із спектром частот радіозонда. На частоті 30 МГц відбувається основне посилення сигналів до рівнів, необхідних для роботи системи визначення координат. Третє перетворення (у частоту 465 кГц) застосоване для побудови системи АПЧ-465 по частоті суперізації радіозонда при її відходах в процесі польоту. Для контролю роботи приймальної системи є пристрій вимірювання коефіцієнта шуму і імітатор сигналу радіозонда.

Система визначення координат використовує паузу у випромінюванні передавача радіозонда для вимірювання похилої дальності, а також забезпечує синхронізацію роботи всієї апаратури в часі і видачу даних про координати радіозонда в міні-ЕОМ.

Система управління антеною працює по методу рівносигнальної зони і забезпечує автоматичний супровід радіозонда по кутових

координатах протягом всього підйому.

Система відображення інформації призначена для оперативного відображення на дисплеї координатно-телеметричної, метеорологічної і контрольної інформації в аналоговій і цифровій формі, реєстрації початкової і поточної інформації на алфавітно-цифровому друкуючому пристрої (АЦПУ) і видачі аерологічних телеграм на телетайп.

Система обробки і управління обробляє первинну координатно-телеметричну інформацію, розраховує значення метеорологічних величин відповідно до алгоритму, здійснює обробку і видачу даних в систему відображення інформації, складає аерологічні телеграми, виробляє команди і управляє роботою апаратури в ході радіозондування, спільно із системою автоматичного контролю забезпечує контроль роботи систем комплексу. До складу системи входить міні-ЕОМ із заздалегідь заданою (жорсткою) програмою обробки.

Окрім функціонального контролю в комплексі передбачені автоматичний тестовий контроль працездатності міні-ЕОМ, перевірка чутливості приймального пристрою, працездатності телеметричного тракту, програмного забезпечення. Є апаратура для передполітної перевірки радіозонда і допоміжні контрольно-вимірювальні прилади.

При розміщенні комплексу АВК-1 на території станції обов'язково мають бути забезпечені наступні вимоги:

- передбачені розміри санітарно-захисної зони РЛС;
- пряма видимість майданчика для випуску радіозондів від місця установки антени на службовій будівлі;
- пряма видимість майданчика для випуску радіозонда із апаратного приміщення і надійний зв'язок оператора з будкою, майданчиком для випуску і газогенераторним приміщенням;
- відстань від будівлі до майданчика не менше 100 м для надійного автозахоплення радіозонда у момент випуску (крім того, майданчик має бути розташований з підвітряного боку від будівлі, аби радіозонд відразу після випуску віддалявся від комплексу);
- максимально допустимий негативний кут нахилу антени на місці випуску 10° (при цьому не допускається перекриття прямої видимості майданчика від країв антени сторонніми предметами);
- кути закриття видимого від антени горизонту не більш $3-4^\circ$.

Система „Титан-МАРЗ-2” (разом з аналогічною системою „Метеорит-РКЗ”) іноді відноситься до класу інформаційно-вимірювальних систем радіотелеметрії. Вона дозволяє реєструвати температуру і вологість атмосфери уздовж траєкторії польоту радіозонда (через кожних 2,5 або 5 секунд), а також місцеположення радіозонда і час, що пройшов з моменту його випуску (через кожних 30 с).

Радіозонд містить наступні основні вузли (рис. 9.3): вузол

температури, вузол вологості, електронний комутатор, перетворювач опір-частота, НВЧ-автогенератор, генератор імпульсів і стабілізатор напруги і струму.



Рис. 9.3 – Структурна схема радіозонду

НВЧ-автогенератор працює в режимі надрегенерації і перебуває на порозі самозбудження і генерації коливань на частоті 1782 ± 8 МГц. Для переходу його в генеруючий стан необхідний невеликий „поштовх”, яким є або імпульсна напруга від генератора імпульсів, або запитальний імпульс від РЛС.

Розглянемо спочатку роботу радіозонда за відсутності запитального сигналу від РЛС. В цьому випадку НВЧ-автогенератор виробляє радіоімпульси під дією сигналів від генератора імпульсів. Форма сигналів, що генеруються, представлена на рис. 9.4а. Тривалість імпульсів на рівні половинної потужності дорівнює $0,13-0,32$ мкс. Сигнали зображені спрощено, оскільки в одиночному імпульсі генерується приблизно $400-1200$ періодів синусоїдальної напруги.

На рис. 9.4б представлена форма сигналів при розгляді великих часових інтервалів. Одиночний радіоімпульс умовно зображений у вигляді вертикального відрізка прямої. Штрихові лінії, що зв'язують рис. 9.4а і рис. 9.4б умовно встановлюють відповідність масштабів по осі часу. Формування тривалих пауз відбувається, коли на автогенератор НВЧ із перетворювача опір-частота надходять негативні імпульси, що закривають транзистор автогенератора.

Тривалість цих пауз постійна для конкретного екземпляра радіозонда. Частота ж їх проходження залежить від опору, що підключається до перетворювача опір-частота електронним комутатором. Останній підключає або один опорний контрольний опір $R_{оп}$, або послідовно сполучені опори $R_{оп} + R_t$ або $R_{оп} + R_c$, де R_t – терморезистор, R_c – опір,

змінний при зміні відносній вологості, наприклад, гігрістор.

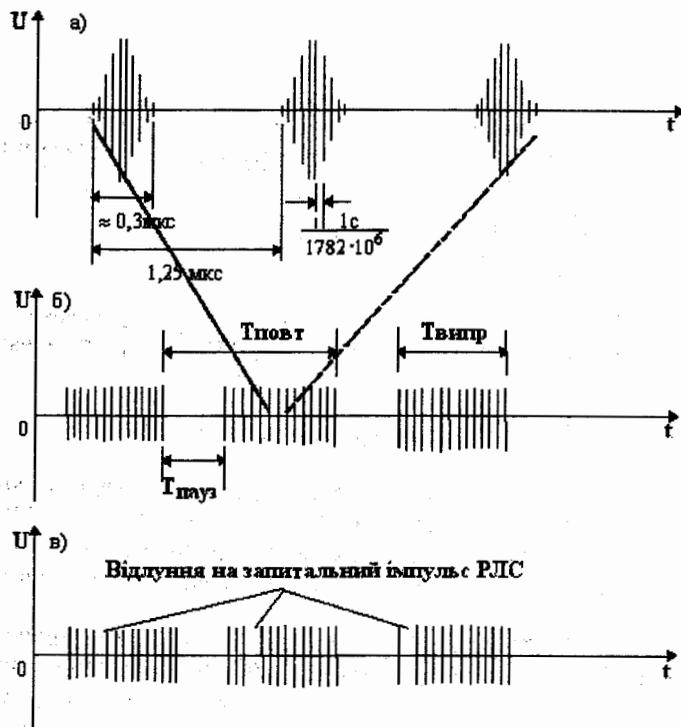


Рис. 9.4 – Екюри напруг радіозонда

Частота проходження негативних імпульсів напруги від перетворювача опір-частота тим вище, чим менше підключений до нього опір. Тому найвища частота ($F_{оп}$) буде у разі підключення тільки опорного опору. Зміна ж частоти F , пов'язана із зміною опорів, що підключаються, дозволяє судити про зміни температури і відносній вологості в атмосфері.

В процесі польоту радіозонда на частоту F можуть робити вплив багато неконтрольованих спотворюючих чинників, наприклад, зменшення ЕДС джерела живлення. Тому для зменшення погрішності, визначення температури і відносній вологості проводиться не за значенням частоти F , або F_b , що випромінюється при підключенні до перетворювача відповідних опорів, а по відношенню цих частот до частоти $F_{оп}$.

У радіозонді передбачена послідовна зміна частот сигналів, що генеруються, в циклі $F_{оп}, F_b, F_b$, що відбувається через 25 ± 5 с.

Режим роботи радіозонда змінюється під час вступу на нього запитального імпульсу РЛС тривалістю приблизно 1,5 мкс на тій же частоті, на якій генерує радіозонд. Антенна система радіозонда приймає запитальний сигнал, внаслідок чого в коливальному контурі НВЧ автогенератора виникають коливання, які, у свою чергу, ініціюють генерацію радіозонда. Радіозонд випромінює весь час, поки він опромінюється запитальним сигналом РЛС. Якщо у момент дії запитального сигналу від РЛС на НВЧ автогенератор радіозонда поступає сигнал від генератора імпульсів або у момент дії сигналу від генератора імпульсів на радіозонд поступає запитальний сигнал від РЛС, то генерація сигналів радіозондом триває до закінчення дії будь-якого з сигналів, що ініціюють генерацію.

Оскільки генерація сигналів, що відбувається під дією запитального імпульсу, триває декілька довше за генерацію під дією генератора імпульсів, то „відгук”, що генерується, може опинитися більшої тривалості. З цієї причини, після відгуку на запитальний сигнал РЛС, НВЧ-автогенератор радіозонда протягом 0,8–1 мкс повинен „відновлюватися”. В цьому випадку, якщо після закінчення запитального імпульсу черговий сигнал від генератора імпульсів поступить на НВЧ-автогенератор через часовий інтервал, менший 0,8–1 мкс, останній або на нього взагалі не відреагує, або згенерує радіоімпульс, амплітуда якого буде істотно менша, ніж в звичайній ситуації. У цих випадках відгук виявляється як провал або цілковита відсутність одного з радіоімпульсів, що випромінюються радіозондом, і спостережуваний з періодом запуску зондових імпульсів РЛС.

Якщо запитальний імпульс РЛС поступить під час паузи у випромінюванні радіозонда, обумовленою дією негативної напруги від перетворювача опір-частота, то відгуку від радіозонду не буде. При нормальній роботі РЛС відгуків виявляється достатньо для упевненого визначення відстані до радіозонда і його автоматичного супроводу по дальності.

Приєм випромінених сигналів і обробка інформації про час, що минає з моменту запуску радіозонда, його сферичні координати, температуру і відносну вологість здійснюється РМС „Титан”.

РМС „Титан” складається з блоків, що наведені на рис. 9.5.

Передавальний блок генерує потужні НВЧ-радіоімпульси тривалістю 1,5 мкс. Запуск передавача здійснюється імпульсами, що надходять з блоку вимірювання дальності.

Антенний блок формує скануючий промінь, що обертається в просторі із швидкістю 37 обертів за 1 с. Максимум діаграми направленості зміщений щодо геометричної осі на невеликий кут (рис. 9.5). В результаті обертання відбувається так, що максимум діаграми направленості

переміщається по конічній поверхні, вісь якої збігається з геометричною віссю параболічного відбивача. В цьому випадку сигнал, що приймається від цілі, розташованої на осі відбивача, не змінюється по величині при конічному обертанні антени. Такий напрям ОА називається рівносигнальним.

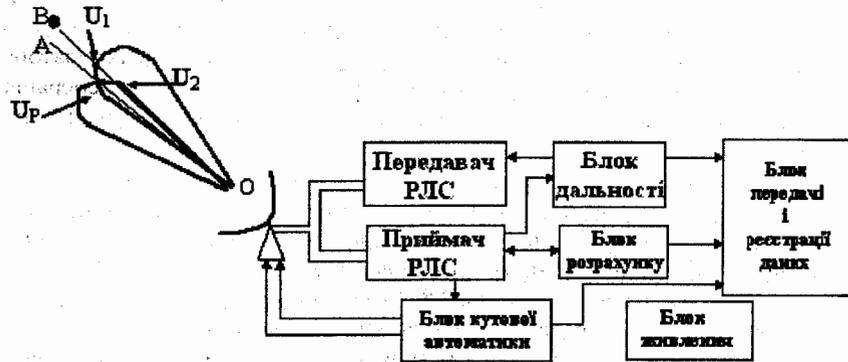


Рис. 9.5 – Структурна схема РМС „Титан”

Якщо радіозонд зміщений відносно рівносигнального напрямку, як це представлено на рис. 9.5 (напрямок ОВ), то сигнал, що приймається, змінюватиметься по частоті з частотою обертання антени. Появу регулярних змін амплітуди сигналу, що приймається, з частотою 37 Гц вказує на необхідність повороту антенної системи. При цьому в блок управління антеною з приймального пристрою надходить сигнал, що змінюється з частотою 37 Гц, який після відповідних перетворень, призводить до формування управляючої напруги для електродвигуна антенної системи. Ця напруга змусить переміститися антену по азимуту і куту місця до тих пір, поки ціль знову не опиниться на рівносигнальному напрямі.

Сигнал в приймальному тракті відрізняється від сигналу, що випромінюється радіозондом наявністю шумової напруги, що приймається антеною від сторонніх (промислових, атмосферних) джерел, випромінювання яких спостерігається в широкому спектрі частот. Ще одна причина відмінностей пояснюється можливими змінами амплітуди сигналу, що приймається, з частотою 37 Гц із-за відхилень радіозонда від рівносигнального напрямку (рис. 9.6, часовий інтервал 1–2). Нарешті, сигнал в приймальному тракті може істотно слабшати, навіть „завмирати” унаслідок можливого розгойдування радіозонда, коли з урахуванням

достатньої вузької діаграми направленості антени істотно слабшає потік випромінюваної енергії у бік РЛС (рис. 9.6, часовий інтервал 3–4).

Штрихові лінії на рис. 9.6 (так само як і на рис. 9.4) показують, як умовно відображаються однакові по тривалості процеси в різних часових шкалах. Часовий масштаб однаковий на рис. 9.6б, в і на рис. 9.6г, д, е.

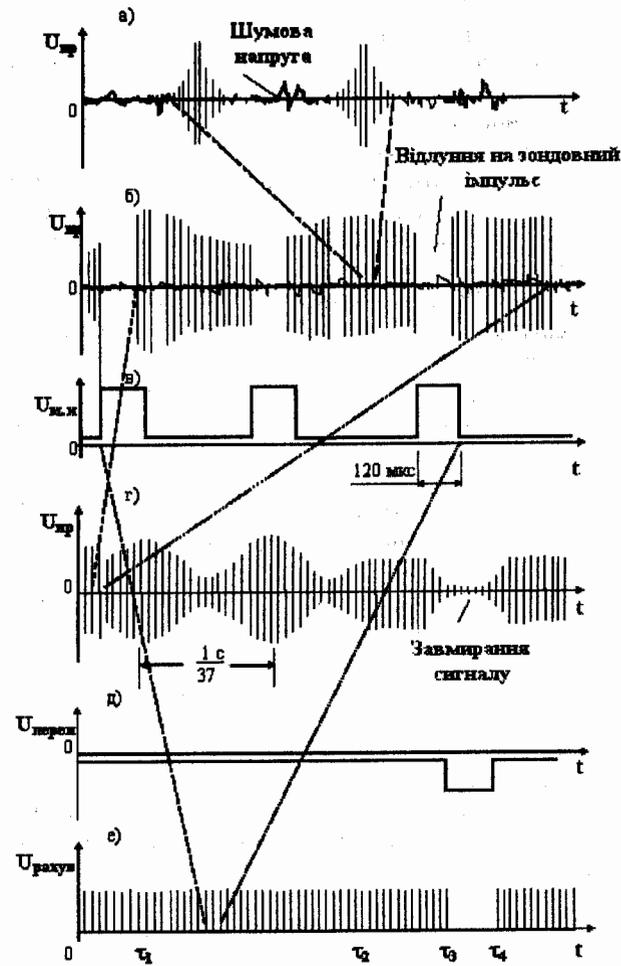


Рис. 9.6 – Емпори напруг РМС „Титан”

У приймальному тракті формуються сигнали, звані метеоімпульсами $U_{м.к}$ (рис. 9.6е). Їх формування починається у момент початку ~~заузи~~ ~~між~~ ~~окремими~~ циклами сигналів, що випромінюються радіозондом (рис. 9.6б і 9.6в). Метеоімпульси мають однакову амплітуду і тривалість і поступають в блок рахунку.

Для виключення помилок, які можуть виникнути, якщо під час рахунку метеоімпульсів відбудеться завмирання сигналу, в приймальному тракті формується напруга перепаду $U_{пер}$ (рис. 9.6д). Як тільки сигнал, що приймається, стає менше заданого при налаштуванні порогу, в приймачі встановлюється низький рівень сигналу перепаду і формування метеоімпульсів припиняється (рис. 9.6г–е, часовий інтервал 3–4τ). Сигнал перепаду також подається в систему рахунку.

Для визначення частоти $F_{об}$, F_b , F_f в блоці рахунку підраховуються метеоімпульси, що поступають з приймального пристрою за часовий інтервал, званий часом рахунку. Якщо сигнал, що поступає від радіозонда, перевищує мінімальний рівень, при якому формується високий рівень напруги перепаду, то відбувається безперервний рахунок імпульсів протягом 1 секунди. Для виключення впливу на результат рахунку завмирань і різних ослаблень сигналу рахування метеоімпульсів супроводжується контролем сумарного часу рахунку.

Підраховування метеоімпульсів триває до тих пір, поки сумарний часовий інтервал не стане рівним 1с.

У блоці рахунку формується імпульс, тривалість якого дорівнює часу лічби. Цей імпульс подається в канал запуску передавача, і поки здійснюється лічба метеоімпульсів, передавач не генерує запитальних імпульсів.

У блок вимірювання дальності з приймального пристрою надходить сигнал, що містить відгук на запитальний сигнал РЛС. По часовому інтервалу, що розділяє моменти посилання запитальних імпульсів РЛС і відгуку в сигналі, що приймається, визначається відстань до радіозонда.

Дані про кутові координати радіозонда, відстані до нього і значення частот $F_{об}$, F_b , F_f поступають в блок передачі і реєстрації даних. У ній же визначається час, що пройшов з моменту випуску радіозонда, і кожні 2,5 або 5 секунд віддруковуються дані про частоту метеоімпульсів, що приймаються, а кожні 30 секунд – додаткові дані про час і сферичні координати радіозонда.

9.5 Система радіозондування „Радіотеодоліт-УЛ”

Комплекс радіозондування атмосфери „Радіотеодоліт-УЛ” призначений для прийому та обробки в автоматичному режимі сигналів аерологічних параметрів атмосфери, що надходять від зондів РЗА та

ПАЗА, визначення координат радіозонду, визначення швидкості та напрямку вітру, барометричного тиску на даній висоті та передачі в автоматичному режимі результатів зондування атмосфери. Модифікації системи наведені в табл. 9.1, зондів – в табл. 9.2, 9.3 і 9.4.

Таблиця 9.1 – Модифікації систем радіозондування „Радіотеодоліт-УЛ”

Позначення	Режими роботи	Діапазон робочих частот	Смуга
Радіотеодоліт-УЛ.1	вузькодіапазонний	1680±0,5 МГц	0,2 МГц
	широкодіапазонний	1680±0,5 МГц	0,2 МГц
Радіотеодоліт-УЛ.2	вузькодіапазонний	1780±0,5 МГц	0,2 МГц
	широкодіапазонний	1780±0,5 МГц	0,2 МГц

Таблиця 9.2 – Модифікації радіозондів ПАЗА

Модифікація	Діапазон перетворення температури °С	Діапазон перетворення вологості %	Переносна частота, МГц	Частота суперючих імпульсів, кГц
ПАЗА-10	-	-	1782±10	800±25 або 600±25
ПАЗА-10М	-	-		
ПАЗА-11	від мінус 80 до 50	-		
ПАЗА-11М		-		
ПАЗА-12		від 1 5 до 98		
ПАЗА-12М	-	-		
ПАЗА-20	-	-		
ПАЗА-21	від мінус 80 до 50	-		
ПАЗА-22		від 15 до 98		

Основні технічні характеристики системи радіозондування „Радіотеодоліт-УЛ”:

- дальність автоматичного супроводу – до 200 км,
- мінімальна дальність прийому сигналу від радіозонду – не більше за 10 м,
- висота зондування – до 40 км,
- режим роботи комплексу для визначення дальності – автоматичний, для визначення кутових координат – автоматичний, ручне наведення,
- ширина діаграми направленості антени по половинному спаду потужності не більше за 10°,
- коефіцієнт підсилення антени – не менш як 20 дБ,
- чутливість приймальної системи по безперервному сигналу не менш за 142 дБ/Вт,

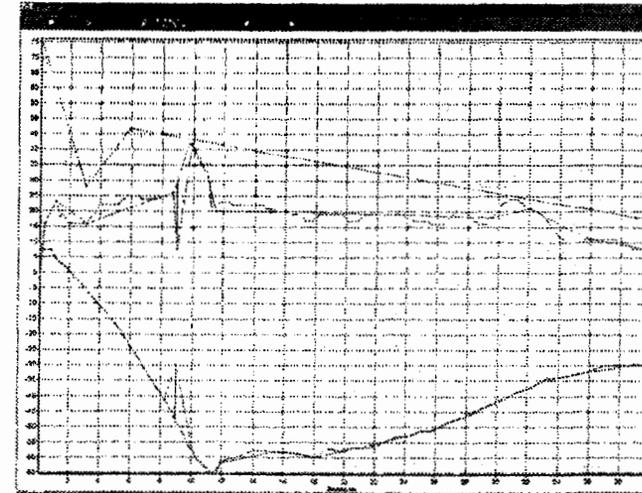
- „Радіотеодоліт-УЛ” проводить перевірку (передпідлітку підготовку) радіозондів до випуску, дає дозвіл на випуск радіозондів та фіксує час початку та кінця зондування,
- „Радіотеодоліт-УЛ” видає таблицю ТАЕ-3 до 6 км через кожні 200 м, до 16 км через 500 м, до кінця зондування через 1 км (рис. 9.7),
- на моніторі відображається інформація про координати радіозонду та значення метеорологічних параметрів, що вимірюються (рис. 9.7),
- девіація сигналу, що приймається ≤ 100 кГц,
- нестабільність смуги пропускання в часі ≤ 10 кГц/год.

Таблиця 9.3 – Основні технічні характеристики радіозондів РЗА

Основні характеристики	РЗА-1	РЗА-2
Переносна частота, МГц	1680±0.5	1780±0.5
Чутливість до запитального імпульсу	—	—
Частота повторення радіосигналів, кГц	800±25	800±25
Номинальний період базового сигналу (F ₆), мкс	від 1449 до 1785	від 1449 до 1785
Період при передачі сигналу відносної температури (F _T), мкс	від 1562 до 58821	від 1562 до 58821
Період при передачі сигналу відносної вологості (F _B), мкс	від 1526 до 2564	від 1526 до 2564
Час передачі кожній з частот телеметрії, с	5±1	5±1
Діапазон перетворення температури повітря в телеметричний радіосигнал, °С	від - 80 до +50	від - 80 до +50
Абсолютна похибка при перетворенні температури, °С	±0,5	±0,5
Діапазон перетворення відносної вологості повітря в телеметричний радіосигнал, %	від 15 до 98	від 15 до 98
Абсолютна похибка при перетворенні відносної вологості, %	±5	±5

Таблиця 9.4 – Функціональні можливості радіозондів ПАЗА

Функції	Модифікація радіозонда		
	ПАЗА-10	ПАЗА-11	ПАЗА-12
Перетворення температури у вимірювальний сигнал	-	+	+
Перетворення відносної вологості у вимірювальний сигнал	-	-	+
Формування у відповідь сигналу на запитний імпульс радіолокатора	+	+	+



Таблиця результатів зондування

Сторона: 11.21.2012
Код: 09.07.2012

Час зондування: 11:21:15
Час прийому: 11:23:02

№	№	Метеорологічні параметри									
		Температура					Вологість				
№	№	Температура	Вологість	Температура	Вологість	Температура	Вологість	Температура	Вологість	Температура	Вологість
0.0	0.0	15.0	75.0	15.0	75.0	15.0	75.0	15.0	75.0	15.0	75.0
0.2	0.2	14.8	74.8	14.8	74.8	14.8	74.8	14.8	74.8	14.8	74.8
0.4	0.4	14.6	74.6	14.6	74.6	14.6	74.6	14.6	74.6	14.6	74.6
0.6	0.6	14.4	74.4	14.4	74.4	14.4	74.4	14.4	74.4	14.4	74.4
0.8	0.8	14.2	74.2	14.2	74.2	14.2	74.2	14.2	74.2	14.2	74.2
1.0	1.0	14.0	74.0	14.0	74.0	14.0	74.0	14.0	74.0	14.0	74.0
1.2	1.2	13.8	73.8	13.8	73.8	13.8	73.8	13.8	73.8	13.8	73.8
1.4	1.4	13.6	73.6	13.6	73.6	13.6	73.6	13.6	73.6	13.6	73.6
1.6	1.6	13.4	73.4	13.4	73.4	13.4	73.4	13.4	73.4	13.4	73.4
1.8	1.8	13.2	73.2	13.2	73.2	13.2	73.2	13.2	73.2	13.2	73.2
2.0	2.0	13.0	73.0	13.0	73.0	13.0	73.0	13.0	73.0	13.0	73.0
2.2	2.2	12.8	72.8	12.8	72.8	12.8	72.8	12.8	72.8	12.8	72.8
2.4	2.4	12.6	72.6	12.6	72.6	12.6	72.6	12.6	72.6	12.6	72.6
2.6	2.6	12.4	72.4	12.4	72.4	12.4	72.4	12.4	72.4	12.4	72.4
2.8	2.8	12.2	72.2	12.2	72.2	12.2	72.2	12.2	72.2	12.2	72.2
3.0	3.0	12.0	72.0	12.0	72.0	12.0	72.0	12.0	72.0	12.0	72.0
3.2	3.2	11.8	71.8	11.8	71.8	11.8	71.8	11.8	71.8	11.8	71.8
3.4	3.4	11.6	71.6	11.6	71.6	11.6	71.6	11.6	71.6	11.6	71.6
3.6	3.6	11.4	71.4	11.4	71.4	11.4	71.4	11.4	71.4	11.4	71.4
3.8	3.8	11.2	71.2	11.2	71.2	11.2	71.2	11.2	71.2	11.2	71.2
4.0	4.0	11.0	71.0	11.0	71.0	11.0	71.0	11.0	71.0	11.0	71.0
4.2	4.2	10.8	70.8	10.8	70.8	10.8	70.8	10.8	70.8	10.8	70.8
4.4	4.4	10.6	70.6	10.6	70.6	10.6	70.6	10.6	70.6	10.6	70.6
4.6	4.6	10.4	70.4	10.4	70.4	10.4	70.4	10.4	70.4	10.4	70.4
4.8	4.8	10.2	70.2	10.2	70.2	10.2	70.2	10.2	70.2	10.2	70.2
5.0	5.0	10.0	70.0	10.0	70.0	10.0	70.0	10.0	70.0	10.0	70.0

Рис. 9.7 – Приклади результатів зондування системою радіозондування „Радіотеодоліт-УЛ”

Контрольні запитання

- 1 Принципи побудови системи радіозондування
- 2 Особливості роботи системи „Малахіт”
- 3 Переваги системи зондування „Метеор” („Метеорит”) над комплексом „Малахіт”
- 4 Технічні характеристики системи „Малахіт”
- 5 Особливості роботи системи „Титан” (АВК-1)
- 6 Поясніть принцип модуляції сигналу передавача радіозонду
- 7 Наведіть структурну схему радіозонду
- 8 Поясніть роботу радіозонду при відсутності сигналу запиту від РЛС
- 9 Поясніть роботу радіозонду при наявності сигналу запиту від РЛС
- 10 Перечисліть основні вимоги до конструкції радіозонду
- 11 Охарактеризуйте радіозонди ПАЗА.
- 12 Перечисліть модифікації радіозонду ПАЗА та їхні функціональні можливості
- 13 Радіозонди РЗА та їхнє використання
- 14 Для чого призначений комплекс „Радіотеодоліт-УЛ”?
- 15 Основні технічні характеристики системи „Радіотеодоліт-УЛ”

10 Спеціальні методи зондування навколишнього середовища

Дослідження у області фізики вільної атмосфери окрім даних про температуру, вологість, тиск і вітер вимагають також відомостей про ряд додаткових характеристик атмосфери, таких, як радіація, вміст озону, аерозолів, вуглекислого газу і т.д. При цьому необхідні дані про їх вертикальний розподіл у вільній атмосфері і залежності від макрочарактеристик атмосфери.

Масові вимірювання вертикальних профілів перерахованих вище параметрів можливі тільки за допомогою радіозондів. Оскільки ці радіозонди на відміну від звичних вимірюють окрім температури, тиску і вологості ще той або інший додатковий параметр, вони одержали загальну назву спеціальних радіозондів, а радіозондування в цілому – спеціальне зондування. Найбільше поширення з всіх відомих поки видів спеціального зондування набули актинометричне і озонметричне радіозондування.

10.1 Актинометричне зондування

Актинометричне радіозондування атмосфери є одним з важливих напрямів розвитку спеціального зондування, яке дозволяє

експериментально вимірювати вертикальні профілі потоків і радіаційного балансу довгохвильової радіації у вільній атмосфері до висоти 30–35 км.

Короткохвильова (КХ) радіація поступає до Землі від Сонця. Довгохвильова (ДХ) радіація – це теплове (інфрачервоне – ІЧ) випромінювання Землі і атмосфери в діапазоні довжин хвиль 4–40 мкм. Довгохвильова радіація є однією з причин трансформації повітряних мас, тому що атмосфера одержує свою енергію від Землі саме шляхом поглинання її ІЧ-випромінювання. Сонячна радіація дуже слабо поглинається атмосферою, і у відсутності хмарності велика її частина досягає поверхні землі, поглинається нею, а потім вже у вигляді теплового випромінювання підстильної поверхні сприймається атмосферою.

Актинометричне радіозондування атмосфери відбувається за допомогою актинометричних радіозондів (АРЗ). Вони складаються, як правило, з стандартних аерологічних радіозондів і актинометричних приставок (радіометрів). На принципі сполучення датчиків радіації з мережевими радіозондами засновані практично всі конструкції АРЗ, оскільки це дозволяє використовувати мережеву приймальну апаратуру.

Найбільш широко використовують нічні актинометричні радіозонди що вимірюють довгохвильову радіацію в нічний час, оскільки в нічний час в атмосфері присутня тільки довгохвильова радіація і здійснити її вимірювання з технічної точки зору простіше.

В результаті обробки даних актинометричного радіозонда одержують разом із стандартною аерологічною інформацією також дані про висхідний потік ДХ-радіації $Q\uparrow$, низхідний потік $Q\downarrow$; про ефективне випромінювання F системи земна поверхня–атмосфера, яке представляє різницю висхідного і низхідного потоків радіації. Величини $Q\uparrow$, $Q\downarrow$ і F виражаються у Вт/м^2 ($1 \text{ кал/}(\text{см}^2 \cdot \text{хв}) = 698 \text{ Вт/м}^2$).

Різниця ефективних випромінювань на межах шару ΔH визначає собою силу притоку довгохвильової радіації до цього шару. Шар вихолоджується, якщо ефективне випромінювання на верхній межі шару F_2 більше, ніж на нижній межі F_1 , і нагрівається, якщо $\Delta F = F_2 - F_1$ негативне. Радіаційна притока тепла дозволяє обчислити швидкість радіаційної зміни температури повітря dt/dt $^\circ\text{C/год}$, тобто ту зміну температури, яка викликається процесами поглинання або випромінювання довгохвильової радіації.

Актинометричний радіозонд АРЗ-ЦАО. У більшості приладів, що вимірюють радіаційні потоки, використовується ефект теплової дії радіації. У термоелектричних радіометрах і балансомірах в результаті теплової дії радіаційних потоків на їх верхні і нижні поверхні виробляється електрорушійна сила, пропорційна різниці цих потоків. Мірою інтенсивності падаючої радіації в термометричних радіометрах є температура приймальної поверхні, яка зростає при збільшенні падаючого

на цю поверхню радіаційного потоку. Приймальна (чутлива) поверхня прагне прийти в теплову рівновагу з навколишнім середовищем. Для того, щоб визначити величину потоку радіації, падаючого на приймальну поверхню, треба виміряти температуру приймальної поверхні і визначити екрануюче випромінювання.

Радіометр актинометричного радіозонда призначений для вимірювання в нічний час висхідного і низхідного потоків довгохвильової радіації Землі і атмосфери.

Будова радіометра показана на рис. 10.1. Він є циліндром 6 діаметром 140 мм і заввишки 30 мм, всередині якого знаходяться дві приймальні пластини 4 і три проміжні екрани 2 з алюмінієвої фольги завтовшки 10–12 мкм. Фольга кріпиться на кільцях 1 шириною 10 мм. Для вимірювання температур приймальних поверхонь пластин використовуються напівпровідникові терморезистори ММТ-1 3, які кріпляться з внутрішньої сторони до кожної приймальної пластини за допомогою накладки з фольги. Зовнішні поверхні приймальних пластин разом з опорними кільцями чорняться сумішшю сажі, шелаку і клею БФ. Коефіцієнт поглинання такого покриття близький до одиниці.

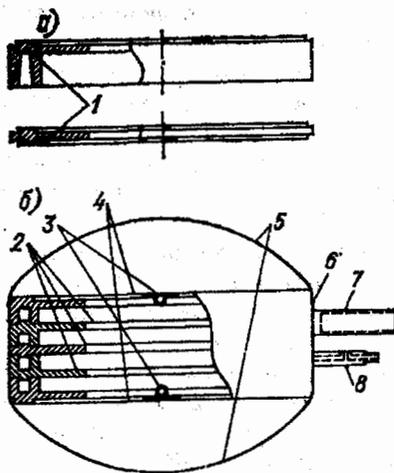


Рис. 10.1 – Будова радіометра радіозонду АРЗ-ЦАО
а – кріплення приймальних поверхонь та проміжних екранів,
б – радіометр в розрізі

З метою захисту приймальних поверхонь від природного обдуву до корпусу балансоміру приварюються поліетиленові екрани 5. Ці екрани

мають опуклу форму завдяки постійному надмірному тиску всередині приладу (20–50ГПа). Перед стартом радіометр піддувається повітрям через спеціальний клапан-ніпель 8. Надмірний тиск зберігається завдяки герметичності корпусу. Клапан-ніпель автоматично регулює надмірний тиск і дозволяє повітрю виходити під час підйому радіозонда, тим самим, оберігаючи екрани 5 від розриву. Радіометр кріпиться на штанзі за допомогою утримувача 7. Всередині на кільцях розпорів зроблені отвори для того, щоб повітря, яке витікає з корпусу радіометра, омивало ці кільця і, тим самим, зменшувало вплив корпусу на температуру приймальної поверхні.

Актинометричний радіозонд АРЗ-ЦАО є актинометричною приставкою до звичайного мережевого радіозонда типа РКЗ або МАРЗ. Радіометр АРЗ-ЦАО має дві приймальні поверхні: верхню і нижню. При польоті радіозонда вимірюється температура обох поверхонь. Радіозонд разом з приставкою і називається актинометричним радіозондом. Загальний вид його (сумісно з РКЗ) показаний на рис. 10.2. АРЗ-ЦАО складається з радіоблоку, що комутує пристрої, батареї живлення і датчика вологості, які розміщені в кожусі приладу 1, а також включає винесені за кожух датчик температури 2 і радіометр 3. Радіозонд призначений для спільної роботи з РЛС „Метеорит”. Передача відомостей про температуру і відносну вологість, а також пеленг і автоматичне стеження за радіозондом здійснюються аналогічно радіозондам РКЗ або МАРЗ.

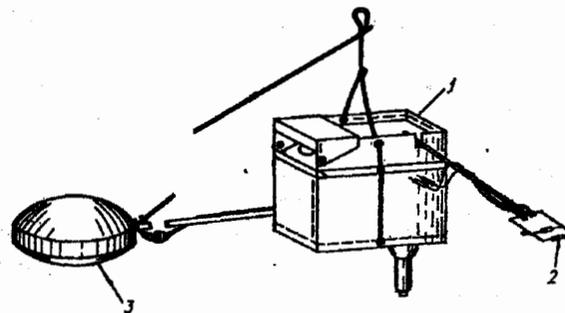


Рис. 10.2 – Загальний вигляд радіозонду АРЗ-ЦАО

Радіозонд забезпечує вимірювання в діапазонах: температури від 50 до -80°C , відносної вологості від 10 до 100 %, потоків довгохвильової радіації від 0 до 500 Вт/м^2 . Тиск розраховується по висоті радіозонда і температурі повітря. Маса радіозонда не перевищує 1500 г, довжина підвісу 30 м.

Великий обсяг даних АРЗ-ЦАО дозволив вивчити меридіональні і

широтні зміни ДХ-радіації у вільній атмосфері, її часову мінливість при різних синоптичних ситуаціях.

10.2 Озонометричне зондування

Дослідження атмосферного озону – область фізики атмосфери, що інтенсивно розвивається зараз, оскільки озон виконує велику роль в атмосферних процесах. Крім того, озон поглинає ультрафіолетову радіацію Сонця з довжиною хвилі менше 0,290 мкм, надлишок якої шкідливо відображається на розвиток живих організмів.

Дослідження озону в даний час ведуться експериментальними і теоретичними методами. Світова озонометрична мережа включає близько 130 станцій, які проводять щоденні вимірювання загального вмісту озону у вертикальному стовпі повітря, використовуючи спостереження з землі. У деяких країнах створені мережі станцій (США, Індія) або окремі станції (Швейцарія, Італія) для систематичних вимірювань розподілу озону по висоті. Вимірювання виконуються озонними зондами, що піднімаються на повітряних кулях до висоти 30–40 км. Останніми роками весь більший розвиток одержують супутникові і ракетні вимірювання озону.

Озонзонди – це прилади, які піднімаються на кулях-зондах, що застосовуються для вимірювань кількості озону безпосередньо у верхній атмосфері. Результати вимірювань передаються на землю за допомогою радіосигналів. Як і актинометричні, озонзонди об'єднують з мережним радіозондом, що дозволяє з'являти спостережувану стратифікацію озону з температурою.

Відповідно до прийнятих методів вимірювання озону озонзонди розділяються на оптичні, хемілюмінесцентні і електрохімічні. Найбільше поширення набули електрохімічні озонзонди.

У оптичних зондах загальний вміст озону в шарі атмосфери, розташованому над радіозондом, визначається по ослабленню сонячної радіації в смугах поглинання озону. Інакше кажучи, оптичні озонзонди засновані на принципі вимірювання інтенсивності ультрафіолетової радіації, що поступає до приладу від Сонця. Всі оптичні озонзонди вимірюють загальну кількість озону $x(z)$, що знаходиться в даний момент над приладом, що досяг висоти z . За допомогою чисельного

диференціювання $x(z)$ по z може бути обчислена щільність озону $\rho_{O_3}(z)$ на різних висотах.

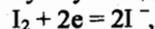
Загальний вміст озону в шарі над рівнем z розраховується по послабленню інтенсивності радіації в смузі поглинання озону, яке визначається шляхом порівняння з інтенсивністю радіації поза цією смугою. Оптичні озонзонди дуже дорогі і зараз майже не застосовуються.

У хемілюмінесцентному радіозонді концентрація озону вимірюється по ефекту збудження люмінесцюючого шару, який під впливом озону починає світитися, тобто хемілюмінесцентні озонзонди використовують ефект свічення деяких речовин (люмінал, родамін) під дією озону (люмінесценція), причому це свічення тим сильніше, чим вища концентрація озону в повітрі. Найвідомішим є озонзонд Регенера, він використовувався в США в шестидесяті роки 20 сторіччя.

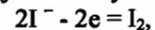
Основою хемілюмінесцентного озонзону є люмінофорочутливий елемент, який випромінює світловий потік при контакті з повітрям, що прокачується через камеру. Повітря прокачується насосом, і світловий потік потрапляє в приймач-фотопомножувач. Потужність світлового випромінювання пропорційна концентрації озону. При цьому, зрозуміло, всередину не повинне проникати світло. Хемілюмінесцентні озонзонди не знайшли широкого застосування через складність їх передполітної підготовки і нестабільності чутливості.

У електрохімічних озонзондах вимірюється ефект хімічної дії озону на розчин чутливої до озону речовини. Електрохімічні озонзонди вперше були запропоновані Брюером і Мільфордом (Великобританія). Ідея їх методу полягала у тому, що з розчину йодного калію (КІ) озон виділяє вільний йод $2KI + O_3 + H_2O = 2KOH + I_2 + O_2$.

Якщо в розчин занурити два електроди, до яких прикласти невелику напругу (десять частки вольта), то за відсутності озону і йоду струму не буде. При появі йоду його молекули у катода утворюють іони



котрі потім рухаються до аноду. Поблизу анода йод відновлюється:



і якщо, так чи інакше, перешкодити поверненню його в масу розчину, то поточний струм (заряд, що переноситься) буде пропорційний кількості озону, що реагує з розчином. Можливе застосування інших електролітів для визначення концентрації озону, але принцип роботи у всіх випадках аналогічний описаному. Обов'язковою умовою для радіозондів такого типу є необхідність строгого контролю кількості повітря, що протікає над електролітом.

На рис. 10.3 показана функціональна схема електрохімічного озонзону, яка справедлива практично для будь-якої конструкції. Датчик озону складається з повітрязабірної трубки 1, кулонометричних комірок для вимірювання концентрації озону 2, повітряного фільтру 3, регулятора витрати повітря 4, насоса 5, підсилювача 10, комутатора 7, джерел електроживлення насоса 6, радіоблоку 8 і підсилювача 9.

Повітря через комірку прокачується мікронасосом. Електричні сигнали, що знімаються з електродів комірки, посилюються, перетворюються і через комутуючий пристрій поступають в електричне коло радіоблоку.

Конструктивно, у пінополістироловому корпусі, що складається з двох половинок, знаходяться розміщені у відповідних виїмках: електронний блок, насос, чутлива комірка, управління мотором і електробатарей. Корпус забезпечує теплоізоляцію внутрішніх елементів, оскільки щоб уникнути замерзання водного розчину електроліту температура всередині комірки повинна бути не нижчою 2°C.

В процесі вимірювання через поліетиленовий шланг, що проходить через кришку корпусу, за допомогою мікронасосу всмоктується зовнішнє повітря. Він прокачується через чутливу комірку, яка містить циліндричний катод з платинової сітки (площа близько 6 см²), анодом є срібний провідник (довжина 3 см, діаметр 0,5 мм). Обидва електроди опущені в 0,1% розчин йодного калію. Завдяки застосуванню поршня з високоякісної сталі, скляних циліндрів і пластмас, що не вступають в реакцію з озоном, поглинання озону в комірці зведено до мінімуму.

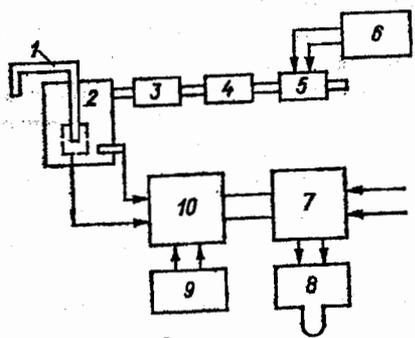


Рис. 10.3 – Функціональна схема електрохімічного озонзонду

Ця комірка використовується спільно з радіозондами типу РКЗ або МАРЗ, тому важливою частиною комірки є перетворювач, що перетворює вимірювальний струм в пропорційну йому частоту проходження імпульсів. Зміна струму від 0 до 7 мА на виході перетворювача відповідає варіації частоти від 50 до 200 Гц. Для з'єднання комірки з передавачем радіозонда є комутатор, зонд з електронним комутатором позначається ОSE-2, а з механічним – OSM-2. Маса озонної комірки складає близько 850 г, розмір 35x22x17 см.

Необхідною умовою хорошої роботи комірки є максимально можлива чистота. У будь-яких інструкціях по проведенню зондування за допомогою електрохімічної комірки на це звертається увага аерологів. Перевірка комірки перед випуском полягає головним чином в перевірці калібрувальної кривої. Для цього застосовується досить складне

лабораторне устаткування, основним елементом якого є генератор озону. Через високу чутливість комірки озонзонди не рекомендується випускати на латексних оболонках, оскільки за ними тягнеться „слід” гасу. Озонзонди випускають на поліетиленових оболонках. Результати обробки звичайно порівнюють з даними вимірювання загального змісту озону, виконаного за допомогою точного наземного приладу. Найточнішим з відомих методів вимірювання ОСО є спектрофотометр Добсона.

Світова мережа озонметричного радіозондування існує приблизно з 1976 р. Програма спостережень звичайно передбачає один випуск на тиждень, а взимку – двічі на тиждень. Для представлення результатів розроблена спеціальна озонograma.

10.3 Аеростатне зондування

Процес вимірювання метеорологічних елементів вільної атмосфери і збір інформації про атмосферні процеси за допомогою аеростатів називається аеростатним зондуванням. По характеру використовуваних траєкторій аеростатів розрізняють горизонтальне і вертикальне зондування.

Горизонтальне зондування здійснюється при дрейфі закритих аеростатів на одному або декількох заданих рівнях, висоти яких визначаються конкретними задачами. В даний час аеростатне зондування здійснюється в шарі від 1,5 до 35 км. Найчастіше використовуються аеростати з закритою оболонкою при дрейфі на рівні 500 мбар. З технічної точки зору можливе зондування і на рівнях 700 і 850 мбар, проте воно здійснюється рідко, оскільки на цих рівнях можливі часті обмерзання оболонки. При горизонтальному зондуванні в основному визначаються характеристики поля вітру.

Про поле вітру можна судити по траєкторії польоту аеростата, що відбиває перенесення повітря на даній висоті. Для вимірювання швидкості і напрямку вітру при такому зондуванні достатньо на підвісці мати тільки радіопередавач і джерело живлення. Вимірювання координат аеростата здійснюється з Землі методом пеленгації або з ШСЗ з подальшою ретрансляцією. В майбутньому на аеростати горизонтального зондування передбачається встановити радіовисотомір і датчик вологості. На експериментальних аеростатах до складу бортової апаратури входять вимірники температури повітря, вертикального зсуву вітру, температури газу і сили натягнення оболонки. Вимірники сили натягнення оболонки, крім свого прямого призначення, можуть бути використані для обчислення густини і тиску повітря.

Вертикальне зондування може бути здійснене двома шляхами:

– зондування бортовим вимірювальним приладом при примусовій

або природній зміні висоти дрейфу аеростата; зондування за допомогою радіозондів, що скидаються з аеростата в певних точках його траєкторії.

Вертикальне зондування бортовими приладами обмежене порівняно невеликим вертикальним шаром (5–10 км).

Основним методом аеростатного вертикального зондування є метод радіозондів, що скидаються. При цьому аеростат є активним ретранслятором сигналів радіозонда з ціллю забезпечення їх упевненого прийому на наземному вимірному комплексі. Основним джерелом інформації при аеростатному вертикальному зондуванні в даному випадку є сигнали радіозондів, що скидаються.

При вертикальному зондуванні атмосфери методом радіозондів, що скидаються, може бути одержана наступна інформація:

- значення тиску і температури повітря на рівні дрейфу аеростата;
- профіль тиску, температури і вологості повітря від рівня дрейфу аеростата до підстильної поверхні.

Метод вертикального зондування вимагає незалежного визначення барометричної і абсолютної висоти або їх обчислення на основі вимірюного тиску повітря і його температури по вертикальному розрізу.

Сумарна похибка у визначенні висоти може бути визначена незалежними даними радіозондування. Якщо мережа радіозондування відсутня, то помилку орієнтовно можна визначити за середніми кліматичними даними або за даними стандартної атмосфери.

Вимірювання метеорологічних елементів. В процесі проведення аеростатного зондування може бути одержана інформація про характеристики поля вітру, температуру, притоках тепла в атмосферу, радіаційні потоки, характеристики турбулентності і типи макропроцесів.

Характеристики поля вітру. Основними характеристиками поля вітру, які визначаються при аеростатному зондуванні, є швидкість і напрямок, пульсація швидкості вітру, вертикальний зсув, середній вітер в шарі і повний потік, агеострофічне відхилення, а також горизонтальна дивергенція і вертикальна складова вихору вектора швидкості.

Швидкість і напрям. На практиці швидкість вітру при аеростатному зондуванні обчислюється по формулі

$$v = \frac{\Delta R(\varphi, \theta)}{t_2 - t_1},$$

де ΔR – зміна координат аеростату за проміжок часу $t_2 - t_1$.

Порівняння результатів аеростатних і радіозондових вимірювань вітру показує, що вони знаходяться в задовільній згоді. При цьому встановлено, що вимірювання вітру аеростатним методом дає точніші результати, ніж вимірювання радіозондовим (приблизно у 2,5 рази по напрямку і в 2–3

рази по швидкості).

Пульсація швидкості вітру. Швидкість руху аеростата по заданій ізобаричній поверхні визначатиме середню швидкість вітру на даній висоті. Відхилення від цієї швидкості може бути зміряне за допомогою високочутливого вимірального перетворювача прискорення, встановленого на борту аеростата.

Вертикальний зсув вітру. Його можна визначити трьома методами:

- по траєкторіях польоту декількох аеростатів одночасно на декількох фіксованих рівнях;
- при польоті одного аеростата на фіксованому рівні;
- по траєкторії аеростата з коливальним профілем.

При зондуванні декількома аеростатами, що дрейфують одночасно на двох або декількох висотах, для вимірювання вертикального зсуву вітру вибирається відповідна різниця висот польоту аеростатів і по траєкторіях аеростатів обчислюються вектори вітру для одних і тих же моментів часу.

При зондуванні одним аеростатом при польоті на фіксованому рівні використовується спеціальна підвіска (тонкий нейлоновий шнур завдовжки в декілька сотень метрів і більш) з чутливими анемометрами, встановленими в двох або декількох точках. Оскільки вимірювання градієнта напрямку вітру при такому способі пов'язане з значними технічними труднощами, то обмежуються тільки вимірюванням градієнта швидкості вітру.

Для визначення вертикального зсуву вітру при коливальному профілі польоту аеростата може бути використаний вираз

$$\Delta v = \frac{v_B - v_H}{\Delta H},$$

де: v_B та v_H – вектори вітру на верхньому та нижньому рівнях шару H на ділянках підйому або зниження.

Середній вітер в шарі та повний потік. При відомій постійній вертикальній швидкості аеростата середній вітер в шарі і повний потік можуть бути обчислені безпосередньо по ділянці траєкторії, що відповідає підйому або спуску аеростата з відкритою (напівзакритою) оболонкою. При коливальному русі аеростата можна двічі в добу вимірювати повні потоки: один раз при підйомі, а другий – при спуску.

При постійній вертикальній швидкості аеростата w повний потік S пропорційний вектору R , що сполучає дві точки траєкторії, відповідно початку і кінцю зниження або підйому:

$$S = \int_0^t v(\tau) d\tau = wR$$

де: t – час досягнення аеростатом рівня стабілізації вночі або зони рівноваги вдень; v – вектор швидкості вітру.

Горизонтальна дивергенція і вертикальна складова вихору вектора швидкості. Вимірювання горизонтальної дивергенції вектора швидкості вітру засноване на геометричному представленні дивергенції двовимірної течії як розширення одиниці площі за одиницю часу. Величину горизонтальної дивергенції можна визначити за даними про траєкторії одночасних польотів трьох аеростатів, запущених на один рівень, відповідно до співвідношення

$$\operatorname{div} v = \frac{1}{\varepsilon} \frac{dS}{dt},$$

де: S – площа трикутника, утвореного траєкторіями трьох аеростатів, що знаходяться на одному рівні.

Для розрахунку вертикальної складової вихору швидкості вітру використовується аналогічна формула:

$$\Omega = \frac{1}{S_1} \frac{dS_1}{dt},$$

де: S_1 – площа трикутника, який утворений траєкторіями трьох одночасно запущених аеростатів, що знаходяться на різних постійних рівнях.

Температура. Вимірювання температури при аеростатному зондуванні має ряд особливостей, які пов'язані з характером обтікання повітряним потоком вимірювальних перетворювачів і дією на них сонячної радіації.

Вимірювання при горизонтальному зондуванні. Вимірювання температури при горизонтальному зондуванні відбувається, як правило, прямим методом з введенням поправок на відповідні похибки. Як вимірювальні перетворювачі найчастіше використовуються терморезистори. Порівняльне зіставлення результатів аеростатних вимірювань температури з даними радіозондування показує, що в темний час доби результати аеростатних вимірювань виявляються заниженими в порівнянні з даними радіозондування. У світлий час доби, навпаки, результати аеростатного зондування виявляються завищеними в порівнянні з даними радіозондування, при цьому найбільші розбіжності доводяться на час, що відповідає максимальній висоті Сонця.

Вимірювання при вертикальному зондуванні. Вимірювання температури при вертикальному зондуванні здійснюється методом скидання радіозондів, при якому виявляються похибки трьох видів: інерційна, радіаційна і швидкісна. В процесі дрейфу аеростата, починаючи з деякої висоти, спостерігається сильний перегрів контейнера з радіозондами, тому після скидання радіозонда потрібен якийсь час для

того, щоб перетворювач радіозонда прийшов в температурну рівновагу з середовищем.

Трансформаційні зміни температури. Під термічною трансформацією розуміється зміна температури повітря за деякий проміжок часу в точці, що переміщається по ізобаричній поверхні так, що її горизонтальні координати співпадають з координатами деякої частинки, яка в початковий момент знаходилася на цій поверхні. Вимірювання трансформаційних змін може бути виконане як при горизонтальному, так і при вертикальному зондуванні.

Притока тепла. Вимірювання притоки тепла необхідне для складання і рішення схем гідродинамічних прогнозів, в яких до теперішнього часу все ще використовується адіабатичне наближення; воно може виконуватися як при горизонтальному, так і при вертикальному зондуванні.

Характеристики атмосферної турбулентності. Для вимірювання характеристик атмосферної турбулентності аеростатним методом використовують горизонтальне зондування. Характеристики дрібномасштабної турбулентності вимірюють за допомогою спеціальних приладів. Характеристики турбулентності середнього масштабу і макротурбулентності одержують за даними про траєкторії польотів аеростатів, не застосовуючи спеціальної апаратури. За наслідками аеростатного зондування можуть бути обчислені лагранжева автокореляційна функція швидкості, дисперсія горизонтальних координат аеростата, коефіцієнт макротурбулентності, структурні функції і спеціальні характеристики турбулентного потоку. Крім того, можуть бути обчислені макропульсації повітряних потоків, інтенсивність турбулентності і кінетична енергія.

10.4 Літакове зондування

Літакове зондування народилося разом з першими літаками. У СРСР мережа літакового зондування, що складається з 31 пункту, функціонувала з 1957 по 1963 р. Пізніше, у зв'язку з інтенсивним розширенням радіозондової мережі і дорожнечою літакових досліджень, мережа літакового зондування була ліквідована. Останніми роками практично у всіх країнах літаки-метеолабораторії (ЛМЛ) використовуються головним чином для проведення експериментів цільового призначення – для вивчення мікрофізики хмар, атмосферної турбулентності, будови фронтів і циклонів (зокрема – тропічних) і т.д.

Однією з важливих переваг сучасного літакового зондування в порівнянні з іншими підйомними платформами є можливість підйому на борту великого числа складних приладів, незалежно від їх габаритів і маси.

Ця обставина забезпечує широку комплексність літакових спостережень. На літаку практично відсутній вплив радіації на результати вимірювань використовуваних датчиків завдяки хорошій вентиляції повітряного потоку. Проте внаслідок дуже великих швидкостей кінетична енергія повітряного потоку викликає перегрів чутливих елементів, що враховується при розміщенні датчиків і надалі при обробці результатів вимірювань. Для зменшення впливу великих швидкостей датчики іноді поміщають всередину спеціального захисту з дуже малим входним отвором, завдяки якому частково гаситься динамічний натиск навігаючого потоку. Окрім цього, при проведенні на борту ЛМЛ деяких видів вимірювань (наприклад, радіаційних, оптичних і ін.) слід враховувати необхідність стабілізації датчиків в просторі, тому такі датчики встановлюються в спеціальних стабілізуючих пристроях.

При використанні літакового зондування є можливість знаходження на борту досвідчених бортаерологів і операторів, у функції яких входить забезпечення працездатності апаратури, безпосередня участь в процесі вимірювань і проведення візуальних спостережень за явищами, які не можна змряти. Бортаеролог фіксує межі хмарних шарів, тип і інші особливості хмарності, оптичні явища і т.д.

На сучасних ЛМЛ встановлені метеорологічні радіолокатори, лазери, телевізійні установки і багато інших складних приладів. ПЕОМ дуже допомагає в організації оперативної обробки літакових спостережень.

Метеорологічний комплекс служить для вимірювання статичного тиску, температури і вологості повітря, швидкості і напрямку вітру.

Вимірювання повного і статичного тиску, як правило, здійснюється трубками Піто, рідше – мембранними манометрами. Звичайно встановлюється декілька датчиків і у польоті визначається середнє значення тиску на кожному рівні. Геометрична висота вимірюється за допомогою радіовисотомірів. Основним датчиком температури є термометр опору, частіше дротяний з тим або іншим захистом (екраном), рідше – терморезистор. Визначення швидкості і напрямку вітру відбувається комплексом приладів, оскільки для цього потрібні дані про швидкість і кут зсуву (навігаційна система), інформація про курс (курсова система), про повітряну швидкість (трубки Піто або спеціальні датчики повітряної швидкості). Зараз обчислення швидкості і напрямку вітру виконує ПЕОМ. Для вимірювання вологості найчастіше використовуються термогігрометри точки роси (інею), можливе також використання методу спектрального поглинання.

Апаратура для дослідження турбулентності вимірює турбулентні пульсації горизонтального і вертикального компонентів пульсації швидкості вітру, пульсації температури і вологості, а також вертикальні і горизонтальні турбулентні потоки тепла, водяної пари і кількості руху. Для

цього використовуються вимірники миттєвих значень кутів атаки і ковзання навігаючого потоку (загальмовані або вільні флюгерки), прискорень, пульсацій повного і статичного тиску, температури, коефіцієнта заломлення повітря. Датчики на спеціальних штангах виносяться в незбурений потік перед фюзеляжем або збоку від нього.

Спеціалізовані бортові метеорологічні радіолокатори призначені для вимірювання відбиваності при радіолокації хмар і опадів. По розподілу радіолокаційної відбиваності можуть бути визначені горизонтальні розміри і вертикальна протяжність хмар, зафіксовані опади і їх інтенсивність, оцінений фазовий склад хмар, з яких випадають опади, а також змряні горизонтальні зсуви вітру в зоні опадів. На борту ЛМЛ встановлюються також доплерівські локатори вертикального зондування, за допомогою яких вимірюються вертикальні рухи частинок хмар і опадів.

Апаратура для дослідження хмар і атмосферного аерозоллю. Дослідження хмар відносяться до найважливіших задач літакового зондування. У польоті визначається фазовий склад хмар (їх краплинна і кристалічна фракції), вимірюються прозорість хмар, концентрація і розмір хмарних крапель і кристалів, водність та льодність хмар. Для цього використовуються фотоелектричні методи, фотометрія, імпактори (пастки), фільтрові забірники і ін. Аналогічна апаратура використовується для вивчення аерозольних частинок.

Метеорографи. Метеорографом називається вимірювальний прилад, який одночасно вимірює і реєструє значення декількох метеорологічних елементів (температуру, вологість, тиск). На сучасних літаках-зондувальниках і літаючих лабораторіях, як правило, використовуються електричні метеорографи (рис. 10.4).

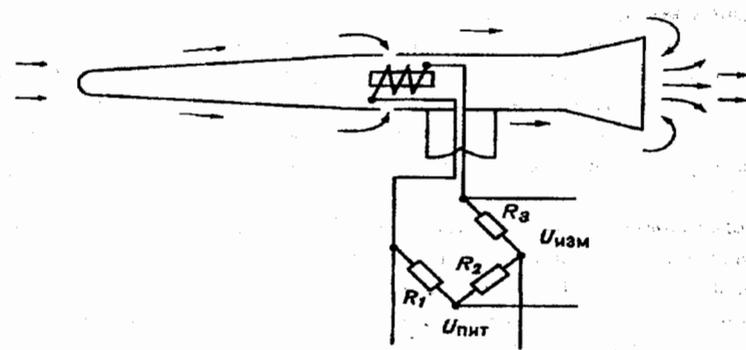


Рис. 10.4 – Будава електричного літакового метеорографа (канал температури)

У електричних метеорографів перетворювачами температури служать резистивні перетворювачі (найчастіше металеві). Приймальна частина перетворювача виконана у вигляді циліндрового ребристого текстолітового каркаса з намотаним на нього тонким платиновим дротом з опором при 0°C близько 800 – 1000 Ом. Терморезистор включений в нерівноважний міст, плечі якого зібрані з високо стабільних резисторів R_1 , R_2 і R_3 . Сигнальна діагональ моста підключається до входу самописця. З ціллю підвищення точності вимірювань по каналу температури метеорограф має декілька діапазонів вимірювань, перемикання яких здійснюється з пульта управління.

Терморезистор поміщається в захисну трубку з закритим переднім кінцем, перехідну в конусоподібний дифузор.

На відстані п'яти діаметрів від передньої частини носика трубки прорізають бічні щілини для входу зовнішнього повітря. Основне призначення захисної трубки – забезпечувати необхідну фільтрацію повітря при польоті в хмарах і опадах. Стійка за допомогою фланця кріпиться до фіюзеляжу літака.

Досвід експлуатації подібних термометрів показав, що вони чутливі до кута атаки, при цьому з збільшенням кута атаки погрішність вимірювань зростає і зменшується коефіцієнт відновлення. Експериментально встановлено, що зміна чутливості і коефіцієнта відновлення знаходиться в допустимих межах при кутах атаки, не перевищуючих $\pm 10^\circ$.

Як перетворювачі вологості використовуються плівкові перетворювачі. Тваринна плівка перетворювача натягнута у вигляді мембрани на металеве кільце. При зміні вологості плівки відбувається зміна її пружності і внаслідок цього зсув движка потенціометра. Напрута розбалансу моста подається на самописець.

Як перетворювачі тиску звичайно використовуються мембранні перетворювачі, рухомий центр яких за допомогою механізму важеля з'єднується з рухомих контактом потенціометра. Подальше перетворення переміщення рухомого центру мембранної коробки в електричний сигнал і його реєстрація відбуваються так само, як і при перетворенні і реєстрації вогкості.

Перетворювач тиску звичайно забезпечується термокомпенсатором і встановлюється в ізолюваному відсіку, куди повітря поступає по повітроводу від щілин забірників повітряного тиску. Точність вимірювання таким методом залежить від напряму наближаючого повітряного потоку щодо осі приймачів. вибір місця установки приймачів повітряного тиску в певній точці корпусу літака має велике значення для забезпечення необхідної точності вимірювань тиску.

Контрольні запитання

- 1 Поясніть термін „спеціальне зондування навколишнього середовища”
- 2 Що таке актинометричне зондування атмосфери?
- 3 Охарактеризуйте короткохвильову (КХ) та довгохвильову (ДХ) радіацію
- 4 Актинометричний радіозонд АРЗ-ЦАО та особливості його роботи
- 5 Що таке озонOMETричне зондування?
- 6 Які ви знаєте типи озонозондів?
- 7 Поясніть принцип дії оптичного зонда
- 8 Поясніть принцип дії хемілюмінісцентного зонда
- 9 Що таке електрохімічні озонозонди?
- 10 Функціональна схема та принцип роботи електрохімічних зондів
- 11 Охарактеризуйте горизонтальне та вертикальне зондування
- 12 Які шляхи та результати вертикального зондування?
- 13 Які існують основні характеристики поля вітру та методи їхнього визначення?
- 14 Вимірювання температури при аеростатному зондуванні
- 15 Особливості літакового зондування
- 16 Які прилади використовують у сучасних літакових радіолабораторіях?

Література

1. Качурин Л.Г. Методы метеорологических измерений. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 456 с.
2. Павлов Н.Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 432 с.
3. Федоров Б.Ф. Лазеры. Основы устройства и применение. – М.: Изд. ДОСААФ СССР, 1988. – 190 с.
4. Воробьев В.И. Оптическая локация для радиоинженеров. – М.: Радио и связь, 1983. – 177 с.
5. Калистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М.: Наука, 1985. – 197 с.
6. Зайцева Н.А. Аэрология. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 325 с.
7. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии: изд. 2-е. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 344 с.
8. Белов Н.П. Метеорологические радиолокационные станции: Учебное пособие для вузов. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 376 с.
9. Николаев А.Т., Перцев С.Т. Радиотеплокация. – М.: Сов. радио, 1964. – 335 с.
10. Качурин Л.Г. Электрические измерения аэрологических величин. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 487 с.
11. Корбан В.Х. Поляризаційна селекція хмар і опадів. – Одеса: Екологія, 2004. – 248 с.
12. Вельміскін Д.І. Теоретичні основи радіолокації: Конспект лекцій. – Дніпропетровськ: Економіка, 2005. – 128 с.
13. Вельміскін Д.І. Теоретичні основи радіолокації: Збірник методичних вказівок до практичних занять. – Дніпропетровськ: Економіка, 2005. – 29 с.
14. Ободовський А.С., Конкин В.В. Обробка кулеплотних спостережень: Збірник методичних вказівок до практичних занять з дисципліни МДЗНС. Частина 1. – Одеса: Екологія, 2003. – 62 с.
15. Ободовський А.С. Збірник методичних вказівок до практичних занять з дисципліни МДЗНС. Частина 2. – Одеса: Екологія, 2003. – 60 с.
16. Ободовський А.С., Перелигін Б.В. Збірник методичних вказівок до практичних занять з дисципліни МДЗНС. Частина 1. – Одеса: Екологія, 2004. – 62 с.
17. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебное пособие для вузов. – М.: Академия, 2007. – 560 с.
18. Правила техники безопасности при производстве гидрометеорологических работ. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 131 с.
19. Ермаков В.И. и др. Системы зондирования атмосферы – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 304 с.
20. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 4, 1973.
21. Ободовський А.С., Перелигін Б.В. Радіофізичні методи зондування навколишнього середовища: Збірник методичних вказівок до чергувань. – Одеса: Екологія, 2004. – 62 с.
22. Ободовський А.С., Конкин В.В. Обробка даних температурно-вітрового зондування атмосфери: Збірник методичних вказівок до практичних занять. Частина 2. – Одеса: Екологія, 2003.
23. Богородский В.В., Козлов А.И. Микроволновая радиометрия земных покровов. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

Навчальне видання

**Перелигін Борис Вікторович
Велика Ольга Іванівна**

**МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Конспект лекцій

Підписано до друку 9.07.12 р. Формат 60х84/16
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 10,46
Наклад 50 прим. Замовлення 705
Видавництво та друкарня "ТЕС"
(Свідоцтво ДК № 771) Одеса, Канатна 81/2
Тел.:(0482)42-90-98, (0482)42-89-72

Надруковано з готового оригінал-макета

Одеський державний екологічний університет

65016 Одеса, вул. Львівська, 15

