

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ СЕМЕНА КУЗНЕЦЯ

О. М. Гоков

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ
ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ РОЗВІДКИ

Навчальний посібник

Харків
ХНЕУ ім. С. Кузнеця
2022

УДК 355.404(075.034)

Г59

Рецензенти: завідувач лабораторії космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, лауреат Державної премії УРСР, канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник *В. А. Поднос*; начальник відділу міжнародного співробітництва та науково-технічної інформації Науково-дослідної установи "Український науково-дослідний інститут екологічних проблем", канд. техн. наук, доцент *Н. С. Цапко*.

Рекомендовано до видання рішенням ученої ради Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця.

Протокол № 8 від 27.10.2021 р.

Самостійне електронне текстове мережеве видання

Гоков О. М.

Г59 Фізичні основи технічних засобів розвідки [Електронний ресурс] : навчальний посібник / О. М. Гоков. – Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2022. – 255 с.

ISBN 978-966-676-848-6

Подано основні теоретичні відомості з навчальної дисципліни "Фізичні основи технічних засобів розвідки". За основу взято матеріал, викладений у відомих навчальних посібниках для студентів, які навчаються в закладах освіти технічного та економічного профілю.

Рекомендовано для студентів спеціальності 125 "Кібербезпека" першого (бакалаврського) рівня усіх форми навчання.

УДК 355.404(075.034)

ISBN 978-966-676-848-6

© Гоков О. М., 2022

© Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, 2022

Вступ

Навчальна дисципліна "Фізичні основи технічних засобів розвідки" є комплексною, її курс містить основні розділи сучасної науки з технічних засобів розвідки та фізики.

Технічна розвідка як один з основних засобів здобування розвідувальної інформації є важливою сферою розвідувальної діяльності спецслужб. Технічні розвідки використовують усі провідні держави для здобування інформації в інтересах забезпечення військово-політичного керівництва своїх країн.

Останніми роками технічні розвідки застосовують часто також в інтересах великого бізнесу. Захист від технічних засобів розвідки є невід'ємною складовою частиною наукової та виробничої діяльності підприємств, установ і організацій оборонної промисловості.

Джерелами інформації для засобів технічної розвідки слугують будь-які фізичні поля, супутні або ті, що виникають у процесі функціонування об'єктів розвідки, хімічні викиди в навколишнє середовище, конструктивні особливості та зовнішній вигляд об'єктів розвідки, допоміжного й полігонного обладнання.

Для вивчення принципів технічних розвідок необхідно володіти як фундаментальними знаннями фізичної науки, так і технічними знаннями в досить широкій галузі, що охоплює основи електротехніки й електроніки, інформатики та обчислювальної техніки, і доповнити їх знаннями мережевих технологій, техніки електричного зв'язку та ін.

Пропонований посібник присвячено систематизованому й поглибленому розгляду теоретичних основ технічних засобів розвідки та фізичних принципів побудови апаратури розвідки. В основу наявних досліджень сутності технічної розвідки покладено можливі фізичні інформаційні поля, що виникають у процесі функціонування тих чи тих об'єктів. Інформацію про технічні характеристики засобів розвідки запозичено з відкритих джерел, переважно з мережі "Інтернет". У цьому посібнику розглянуто цілі, завдання, а також особливості організації технічної розвідки. Наведено загальні характеристики видів технічних розвідок і методичні рекомендації щодо захисту інформації від них.

Фізика як основа сучасного природознавства та головна його складова, має велике значення у формуванні наукового світогляду фахівця

із сучасного обладнання. Без знання фізики неможливо зрозуміти, глибоко засвоїти та розвивати новітні технології, без розуміння сутності фізичних процесів, покладених в основу будь-якого виробництва, неможливо ефективно вирішувати економічні завдання його оптимізації. Через це логічним є побудова нового навчального курсу за назвою "Фізичні основи технічних засобів розвідки". Навчальна дисципліна "Фізичні основи технічних засобів розвідки" є базовою навчальною дисципліною, що вивчають, згідно з навчальним планом підготовки фахівців освітнього ступеня "бакалавр" спеціальності 125 "Кібербезпека". Тому методичною настановою автора було прагнення до балансу між фундаментальною точністю та фізичною наочністю у викладенні навчального матеріалу.

Основою навчального посібника став курс лекцій із навчальної дисципліни "Фізичні основи технічних засобів розвідки", який викладає автор у Харківському національному економічному університеті імені Семена Кузнеця студентам бакалаврату за освітньою програмою "Кібербезпека".

Навчальний матеріал у посібнику побудовано, відповідно до сучасних вимог вищої освіти в Україні. У його основу покладено такі принципи, як компетентність, фундаментальність, інноваційність і діяльнісний підхід. У розробленні змісту навчального посібника було зроблено наголос на фундаментальні знання [6; 10 – 12; 16; 17], що є основною перевагою університетської освіти.

Мета навчального посібника – формування у студентів системи фундаментальних теоретичних знань, прикладних умінь використання базових фундаментальних фізичних понять щодо виробів інформаційних технологій і технічних засобів розвідки, розвиток самостійного мислення у студентів, необхідних для їхньої професійної діяльності.

Для глибшого засвоєння студентами теоретичного матеріалу, що викладають на лекціях, вироблення й розвитку практичних навичок у навчальній дисципліні передбачено практикум. У цьому практикумі студенти виконують лабораторні роботи та навчаються розв'язувати типові задачі за основними темами.

З огляду на це та для більшої зручності й ефективності вивчення теоретичного матеріалу в посібнику стисло наведено основний теоретичний матеріал, який є основою для лабораторних робіт і завдань для самостійного виконання, які частково є новими або наданими у практикумах [4; 5; 8].

Зміст навчального посібника містить усі основні розділи щодо сучасних фізичних основ технічної розвідки.

Основні знання та уміння, які має розвинути вивчення викладеного в посібнику матеріалу, є такими:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

знання основних фундаментальних понять і визначень сучасної фізичної теорії щодо технічних засобів розвідки;

знання можливості практично визначати та характеризувати основні фізичні закони, покладені в основу сучасних технологій і комп'ютеризованого обладнання;

знання можливості виконувати оцінювання параметрів і характеристик різних процесів на підставі фізичних понять та знань;

виявлення небезпечних сигналів технічних засобів;

оцінювання можливості реалізації потенційних загроз інформації, що оброблюють в інформаційно-телекомунікаційних системах, та ефективності використання комплексів засобів захисту в умовах реалізації загроз різних класів;

застосування теорій та методів захисту для забезпечення інформації й елементів інформаційно-телекомунікаційних систем;

уміння використовувати положення фізичної теорії та технічні реалізації для вирішення прикладних завдань у професійній діяльності під час використання технічних засобів розвідки;

уміння інтерпретувати результати виконання спеціальних вимірювань із використанням технічних засобів, контролю за характеристиками інформаційно-телекомунікаційних систем, відповідно до вимог нормативних документів системи технічного захисту інформації.

Кожен із розділів навчального посібника висвітлює базові фізичні основи технічної розвідки як науки.

У *темі 1*: основні поняття й походження технічних розвідок, основні напрями, мета, принципи та завдання технічної розвідки; організація технічної розвідки; класифікація технічних розвідок; види розвідки за простором та носіями розвідапаратури; технічна розвідка з погляду захисту інформації; поняття "технічні канали витоку інформації"; побічні електромагнітні випромінювання; класифікація діапазонів спектра випромінювань, які принципово можуть давати інформацію про різні об'єкти.

У темі 2: основні поняття, принципи оптичної й оптико-електронної розвідки; основи фотометрії; дії світла; спектральна чутливість; контрастна чутливість; роздільна здатність зору; світлова чутливість; видимість об'єкта; світлофільтри; світловий потік; сила світла; яскравість; світність; освітленість; одиниці вимірювання світлових величин; фотометр; дисперсія світла; візуально-оптичні канали; хвильова оптика; інтерференція та дифракція світла; поширення світла в речовині; поглинання світла; розсіяння світла; поняття про голографію; основи фотографічної розвідки; оптико-електронна розвідка; пасивна апаратура й активна розвідка; апаратура реєстрації збереження оптичної інформації; засоби відеоспостереження та знімання; характеристики електронно-оптичних приладів нічного бачення; тепlopеленгатори; радіометри; лазерна розвідка; тепловізійні прилади; засоби фоторозвідки.

У темі 3: основні поняття, особливість основних і неосновних випромінювань, первинних та вторинних електромагнітних випромінювань (ЕМВ); основні поняття радіоелектронної розвідки, радіо- і радіотехнічної розвідки; фізичні основи захисту від радіоелектронної розвідки; розвідувальна апаратура; електромагнітні випромінювання; радіоелектронні засоби; діаграма спрямованості випромінювання; тривалість і період проходження випромінюваних імпульсів; частота, вид амплітудного та фазового спектрів; ширина спектра; первинні та вторинні ЕМВ; узагальнена структурна схема радіо- і радіотехнічної розвідки; імовірність розвідки; максимальна дальність розвідки; сектори ведення розвідки в горизонтальній і вертикальній площинах; частотний діапазон ведення розвідки; точність вимірювання; роздільна здатність за вимірюваним параметром; структурна типова схема станції РР і РТР; способи визначення місця розташування джерел електромагнітного випромінювання; способи визначення частоти сигналів розвідуваних радіоелектронних засобів; інтерференційний вимірювач частоти; кореляційний вимірювач частоти; способи запам'ятовування носійної частоти радіоелектронних засобів; структури сигналів, розвідуваних радіоелектронних засобів.

У темі 4: основні поняття радіолокаційної розвідки (РЛР); виявлення об'єктів у радіолокації; фундаментальні закони та концепції електромагнітного поля; основні характеристики апаратури; основні поняття радіолокаційної розвідки; фізичні основи захисту від радіолокаційної розвідки; видова РЛР; параметрична РЛР; основні характеристики апаратури радіолокаційних станцій (РЛС); імпульсний, фазовий і частотний методи

вимірювання відстаней до об'єктів; визначення напрямку на об'єкти; одночасне визначення відстані, азимуту та кута місця; РЛС зі вздовжфюзеляжною антеною та синтезованою апертурою антени; голографічний метод; загоризонтні РЛС; механізми поширення радіохвиль; принципи роботи загоризонтних РЛС; пасивна багатопозиційна радіолокація.

У темі 5: акустична й гідроакустична розвідка (ГАР); гідролокатор; акустичні випромінювання; активні гідроакустичні засоби; інформативний сигнал; акустичні та гідроакустичні перешкоди; просторово-часові параметри середовища поширення сигналів; закладні пристрої та пристрої перехоплення мовної інформації; характеристики апаратури ГАР; акустичні хвилі в морському середовищі; загасання звуку; відбивання та заломлення звукової хвилі на межі розділу двох середовищ; реверберація в океані; рефракція звуку; підводний звуковий канал; гідроакустичні засоби розвідки; різновиди, основні показники та параметри гідролокаційних станцій (ГЛС); принципи побудови шумопеленгатора; принципи здобування інформації в гідроакустичних інформаційних системах; акустичні хвилі в повітряному середовищі; характеристики акустичних хвиль; структурні акустичні хвилі; радіозакладки; закладні пристрої з передаванням інформації оптичним каналом та електромережею; телефонні закладки; спрямовані мікрофони; пристрої високочастотного нав'язування; основні показники та параметри оптико-акустичної апаратури перехоплення мовної інформації.

У темі 6: радіаційна розвідка; розвідувальна апаратура; класифікація радіаційної розвідки; іонізувальні випромінювання; технічні засоби радіаційної розвідки; детектори іонізувальних випромінювань; явище радіоактивності; властивості радіоактивних випромінювань; основні характеристики радіоактивних випромінювань; прилади для вимірювання іонізувальних випромінювань; характеристика методів реєстрації іонізувальних випромінювань; характеристики детекторів іонізувальних випромінювань.

У темі 7: основні поняття й походження хімічної розвідки; основні напрями, цілі, принципи та завдання хімічної розвідки; методи досліджень і хімічного аналізу та сучасна апаратура наземної, повітряної й морської хімічної розвідки; дистанційна хімічна розвідка; апаратура контактного аналізу та дистанційної хімічної розвідки; контактна хімічна розвідка; апаратура для відбору проб повітря; поглинальні пристрої; витратоміри

та збудники витрат; методи лазерного дистанційного зондування атмосфери; пасивна дистанційна хімічна розвідка.

У *темі 8*: основні поняття й походження сейсмічної розвідки; основні напрями, цілі, принципи та завдання сейсмічної розвідки; поняття й реалізації сейсмічного методу, сейсморозвідувального каналу; сейсмореєструвальний канал; особливості поширення хвиль у пружних середовищах; хвильові поля сейсмічних джерел; поняття про ізохрони та поля часів; сейсмічні хвилі у твердих середовищах; загасання сейсмічних хвиль; хвильові поля сейсмічних джерел; застосування спектрального аналізу для вивчення динамічних характеристик сейсмічних хвиль; пружні хвилі в середовищах, що містять межі розділу.

У *темі 9*: основні поняття й походження магнітометричної розвідки; основні напрями, цілі, принципи, завдання методи, прилади магнітометричної розвідки; основні характеристики магнітного поля; земний магнетизм і його елементи; методи вимірювань елементів земного магнетизму й апаратура магнітометричної розвідки; технічні засоби магнітометричної розвідки; узагальнені дані з порогової чутливості магнітометрів.

У *темі 10*: поняття й походження комп'ютерної розвідки, основні напрями, цілі, принципи та завдання комп'ютерної розвідки; комп'ютерна розвідка з погляду захисту інформації; особливості комп'ютерної розвідки; використання програмних закладок і комп'ютерних вірусів; АСОД і способи несанкціонованого доступу; можливі канали несанкціонованого доступу; розвідувальна апаратура; інформаційна операція та війна; технічні засоби комп'ютерної розвідки; криптоаналіз; кіберпростір; обробна розвідка; активна комп'ютерна розвідка; подолання програмних засобів захисту; подолання парольного захисту; парольний захист і його подолання; методи силового або ВЧ-нав'язування.

У *темі 11*: основні поняття й походження радіотеплової розвідки; основні напрями, цілі, принципи та завдання радіотеплової розвідки; характеристики радіотеплових сигналів; технічні засоби радіотеплової розвідки; інформативний сигнал; фізична сутність теплового випромінювання та його закони; кількісні характеристики радіотеплового випромінювання; радіотеплове випромінювання природних і штучних об'єктів; особливості приймання радіотеплових сигналів; радіотеплові сигнали як носії інформації; енергетичні співвідношення в радіотеплолокації; структурні схеми радіотеплолокаторів.

Розділ 1.

Фізичні основи технічної розвідки 1

1. Технічна розвідка. Основні цілі, принципи та завдання

Мета: розглянути основні поняття й походження технічних розвідок; основні напрями, цілі, принципи та завдання технічної розвідки; розвідка з погляду захисту інформації, поняття "технічні канали витоку інформації".

Основні питання

- 1.1. Основні поняття.
- 1.2. Поняття технічних розвідок.
- 1.3. Мета та завдання технічної розвідки.
- 1.4. Організація технічної розвідки.
- 1.5. Класифікація технічних розвідок.
- 1.6. Поняття "технічні канали витоку інформації".

Ключові слова: технічна розвідка; розвідувальна апаратура; класифікація розвідок; технічні канали витоку інформації; технічні засоби розвідки; інформативний сигнал.

Професійні компетентності:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

здатність розуміти основні напрями, цілі, принципи та завдання технічної розвідки; розвідка з погляду захисту інформації;

здатність аналізувати, виявляти та оцінювати можливі загрози, уразливості та дестабілізаційні чинники інформаційному простору та інформаційним ресурсам, згідно зі встановленою політикою інформаційної та/або кібербезпеки.

Рекомендована література [6; 9; 16].

1.1. Основні поняття

Технічні розвідки використовують усі провідні держави для здобування інформації в інтересах забезпечення військово-політичного керівництва

своїх країн. Останніми роками технічні розвідки все більшою мірою застосовують не тільки в інтересах військово-політичного керівництва, а й в інтересах великого бізнесу.

Застосування технічних засобів дає можливість подолати ряд перешкод у діставанні даних про зарубіжні країни й уникнути ризиків, пов'язаних з агентурною розвідкою. Технічні засоби застосовують із космічного, повітряного, морського та наземного просторів.

Для реєстрації даних використовують усі відомі фізичні принципи дії вимірювальної та реєструвальної апаратури.

Для вивчення принципів технічних розвідок необхідно володіти технічними знаннями в досить широкій галузі, що охоплює фізичну науку, основи електротехніки й електроніки, інформатики та обчислювальної техніки, і доповнити їх знаннями мережевих технологій, техніки електричного зв'язку та ін.

Інформацію про технічні характеристики засобів розвідки запозичено з відкритих джерел, переважно з мережі "Інтернет".

1.2. Поняття технічних розвідок

Технічна розвідка (ТР) є одним із видів розвідувальної діяльності.

У сучасних умовах ведення зовнішньої розвідки загальноновизнано та регламентовано внутрішніми законодавчими актами про національну безпеку, тоді як міжнародне законодавство з питань ведення розвідки державами одна проти одної відсутнє.

Незважаючи на те що відомості про зовнішню розвідку належать до виду інформації, яку найбільш суворо охороняють, деякі загальні відомості про іноземні розвідки нині розкривають у законодавчих і підзаконних актах, інших офіційних та неофіційних джерелах, а також поширюють через відкриті публікації на офіційних сайтах іноземних розвідувальних органів та інші інформаційні ресурси.

Одночасно з веденням зовнішньої розвідки проти інших держав усі країни ведуть контррозвідку та мають норми права, що передбачають покарання за шпигунство.

На певному етапі розвитку технічні розвідки виділили в самостійні підсистеми загальних систем зовнішньої розвідки.

Технічні розвідки становлять організаційно-технічні системи, призначені для здобування розвідувальної інформації на основі збирання розвідувальних даних за допомогою технічних засобів.

Під ТР розуміють також дії, що здійснюються у процесі застосування технічних засобів розвідки (рис. 1.1).

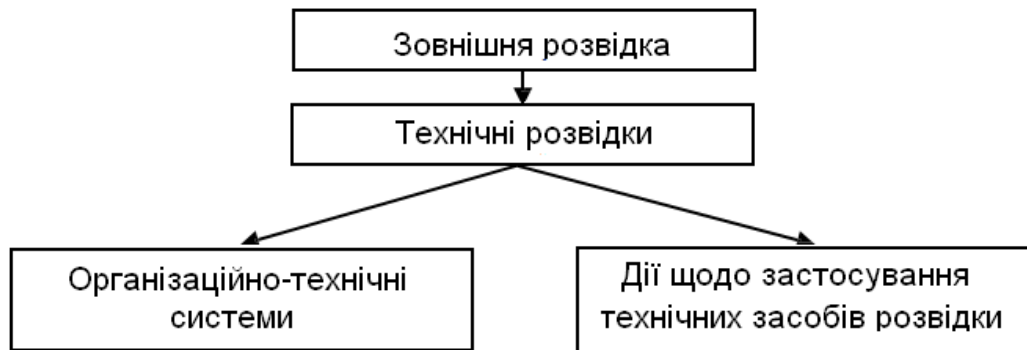


Рис. 1.1. Структура поняття "технічні розвідки"

Технічну розвідку можна класифікувати за кількома ознаками. Першу ознаку пов'язано з *використовуваними носіями засобів здобування інформації*, відповідно до якого ТР розподіляють на:

- космічну;
- повітряну;
- морську;
- наземну.

Другу ознаку пов'язано з *використовуваною апаратурою або способами ведення розвідки*. Згідно із цією ознакою, до ТР належать такі види розвідок:

- оптична та оптико-електронна;
- радіоелектронна;
- акустична й гідроакустичні;
- радіаційна;
- хімічна;
- сейсмічна;
- магнітометрична;
- радіотеплова;
- комп'ютерна.

Технічна розвідка, на відміну від агентурної (яка заснована на діях людей, що проникають на об'єкти розвідки або встановлюють зв'язки з людьми – джерелами інформації), використовує *технічні канали витоку інформації*.

Технічний канал витоку інформації (ТКВІ) – це сукупність носія інформації (що створює інформативний сигнал), фізичне середовище поширення інформативного сигналу й технічного засобу, який використовують для перехоплення інформативного сигналу.

1.3. Мета та завдання технічної розвідки

Під технічною розвідкою розуміють цілеспрямовану діяльність будь-якої держави проти іншої держави зі здобування за допомогою технічних засобів відповідних відомостей, із метою забезпечення військово-політичного керівництва своєчасною інформацією про розвідувані країни та їхні збройні сили.

Завданням технічної розвідки є здобування й подальше опрацювання відомостей про:

зміст стратегічні й оперативні плани збройних сил, їхню боєздатність і мобілізаційні готовності, створення та використання мобілізаційних ресурсів;

напрями розвитку озброєння та військової техніки, науково-дослідні й дослідно-конструкторські роботи зі створення й модернізації зразків озброєння та військової техніки;

кількість, пристрої та технології виробництва ядерної та спеціальної зброї;

тактико-технічні характеристики й можливості бойового застосування озброєння та військової техніки;

дислокацію, чисельність і технічну оснащеність збройних сил;

ступінь підготовки території країни до ведення бойових дій;

обсяги постачань і запаси стратегічних видів сировини та матеріальних ресурсів;

функціонування промисловості, транспорту та зв'язку;

обсяги, план державного оборонного замовлення, випуск і постачання озброєння, військової техніки та іншої оборонної продукції;

науково-дослідні, дослідно-конструкторські та проєктні роботи;

технології, що мають важливе оборонне чи економічне значення;
сільське господарство, фінанси, торгівлю;
зовнішньополітичну й економічну діяльність держави;
систему спеціального зв'язку, державні шифри.

У результаті збирання, накопичення та опрацювання даних із перелічених раніше питань можна здобути досить повну інформацію про стан і перспективи розвитку військового, економічного й науково-технічного потенціалу розвідуваної держави, визначити основні напрями її внутрішньо- і зовнішньополітичної діяльності.

1.4. Організація технічної розвідки

Організація – це широке поняття, яке охоплює організаційну структуру (суб'єктів організаційної діяльності) та саму діяльність.

Основною властивістю організації є єдність мети, заради якої створюють організаційну структуру та виконують різні дії.

Організація характеризується складом і функціями структурних елементів, що входять до неї, характером взаємодії між ними, а також процесами, реалізованими для досягнення мети.

Організація ТР містить розвідувальні органи та служби, які здійснюють ТР, а також процеси ведення ТР. У різних країнах структура органів ТР є різною.

Із метою успішного вирішення поставлених завдань, ТР організують і здійснюють за певними *принципами*:

цілеспрямованості;

централізації керівництва;

розміщення технічних засобів розвідки (ТЗР) поблизу державних кордонів і на території розвідуваної країни;

використанням нерозвідувальних систем і засобів;

формуванням цільових систем розвідки;

колективного використання здобутої інформації технічних засобів розвідки (ТЗР);

залученням учених до опрацювання інформації.

Основними принципами ведення ТР є комплексність, оперативність, безперервність, глобальність, плановість і потайність.

1.5. Класифікація технічних розвідок

Технічну розвідку класифікують за такими принципами:

видами;

вирішуваними завданнями;

використовуваними як джерела інформації для фізичних параметрів об'єктів.

За видами ТР розподіляють на:

космічну;

повітряну;

морську;

наземну (тобто за місцем розміщення апаратури).

За вирішуваними завданнями розрізняють:

стратегічну;

оперативну;

тактичну.

Космічну, повітряну, морську і наземну ТР здійснюють у *фізичних просторах*.

У кожному із цих просторів є фізичні межі, що визначають можливість розміщення та переміщення в них носіїв розвідувальної апаратури.

Комп'ютерну ТР здійснюють у віртуальному просторі (кіберпросторі), технічними компонентами якого є комп'ютери, програмне середовище та мережеве обладнання, які "розміщуються" в мережевому просторі.

ТР здійснюють із використанням розвідувальної апаратури такого *виду та призначення*:

технічних засобів спостереження, призначених для поліпшення можливостей людини зі сприйняття даних про фізичні об'єкти (наприклад, засоби візуального спостереження – біноклі, телескопи, прилади аудіювання – слухові труби);

засобів вимірювальної техніки різного типу, призначених для вимірювання фізичних величин, зокрема тих які не сприймають органи чуття людини;

електронних носіїв програмних засобів, призначених для визначення логічних значень характеристик електронних об'єктів (програм і даних).

Класифікацію діапазонів спектра електромагнітних випромінювань, які принципово можуть давати інформацію про різні об'єкти, наведено в табл. 1.1.

Класифікація діапазонів спектра випромінювань

Ділянки спектра		Довжина хвиль
Низькочастотні коливання	Інфразвукові та звукові коливання	Понад 18 000 м
Радіохвилі	Довгі середні	18 000 – 2 000 м
	Проміжні короткі	2 000 – 200 м
	Ультракороткі	200 – 50 м
		50 – 10 м 10 м – 1 см
Мікрохвильові	1 см – 0,75 мм	
Інфрачервоне випромінювання	Довгохвильове	750 – 15 мкм
	Середньохвильове	15 – 1,5 мкм
	Короткохвильове	1,5 – 0,75 мкм
Видиме випромінювання	Червоне	750 – 620 нм
	Помаранчеве	620 – 590 нм
	Жовте	590 – 560 нм
	Зелене	560 – 500 нм
	Блакитне	500 – 480 нм
	Синє	480 – 450 нм
	Фіолетове	450 – 400 нм
Ультрафіолетове випромінювання		400 – 10 нм
Рентгенівське випромінювання		100 – 0,04 Å
Гамма-випромінювання		0,04 Å і менше

Назви видів розвідки, використовувани в зарубіжних країнах, дещо відрізняються від назв, що використовують у Росії та в Україні, водночас основні ознаки класифікації є схожими.

У США ТР різних видів здійснюють відомства (agencies) – державні органи – члени Розвідувального співтовариства, список яких затверджують законодавчими актами.

Це такі органи, як ЦРУ (CIA) – Центральне розвідувальне управління, АНБ (NSA) – Агентство національної безпеки (NRO), НУР (NRO) – Національне управління розвідки та ін. Усього 16.

У країнах НАТО використовують класифікацію розвідок **на види** ("розвідувальні дисципліни") за видами здобутих розвідувальних даних (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Класифікація розвідок за видом здобутих даних

Видова розвідка (imagery intelligence, IMINT) – здобування технічних, географічних та інших розвідувальних відомостей шляхом інтерпретації й аналізу здобутих зображень і супутніх матеріалів.

Сигнальна розвідка (signals intelligence, SIGINT) – здобування смислових і технічних розвідувальних відомостей шляхом перехоплення сигналів іноземних засобів зв'язку та інших радіоелектронних засобів, а також їхніх побічних електромагнітних випромінювань.

Параметрична (вимірювально-сигнатурна) **розвідка** (measurement and signature intelligence, MASINT) – здобування розвідувальних відомостей шляхом якісного та кількісного аналізу фізичних параметрів об'єктів і подій, здобутих під час виконання спеціальних вимірювань технічними засобами фізичних явищ, супутніх об'єктів і подій, із метою їхнього опису, визначення місця розташування та розпізнавання.

Носіями інформації є:

фізичні поля (і пов'язані з ними інформативні сигнали), створювані об'єктами захисту у фізичному просторі, параметри яких розкривають інформацію, яку захищають;

електронні документи (і пов'язаний із ними смисловий зміст), створювані програмними засобами в кіберпросторі (утвореному засобами опрацювання та передавання даних).

На рис. 1.3 показано види розвідки за видами простору й носіїв розвідапаратури, а на рис. 1.4 – види технічної розвідки за державної належності простору.



Рис. 1.3. **Види розвідки за видами простору й носіїв розвідапаратури**

Для реєстрації інформативних сигналів у ТР використовують **технічні засоби розвідки** (ТЗР), що становлять сукупність розвідувальної апаратури (РА) та її носіїв.

Розвідувальну апаратуру призначено для реєстрації та вимірювання інформативних сигналів.

Носії розвідапаратури призначено для доставляння РА до місця ведення ТР та її зберігання, з метою подальшого використання для виконання завдань ТР.



Рис. 1.4. Види ТР за державної належності простору:
а) у фізичних середовищах; б) у віртуальному середовищі

Носіями розвідапаратури є технічні пристрої, які розміщують у фізичному просторі (ділянки землі, засоби пересування) та віртуальному просторі (комп'ютери, мережеве обладнання).

1.6. Поняття "технічні канали витоку інформації"

Інформацію передають полем або речовиною. Використовуючи ті чи ті фізичні поля, людина створює *систему передавання інформації* або *систему зв'язку*.

Система зв'язку зазвичай складається з передавача, каналу передавання інформації, приймача й отримувача інформації.

З огляду на фізичну природу передавання інформації в разі виконання певних умов можливе виникнення системи зв'язку, яка передає інформацію, незалежно від бажання відправника або отримувача інформації, – **технічний канал витоку інформації** (ТКВІ).

Витік – це безконтрольний вихід конфіденційної інформації за межі організації або кола осіб, яким її було довірено.

Витік (інформації) із технічного каналу – це неконтрольоване поширення інформації від носія інформації, що захищають через фізичне середовище, до технічного засобу, який здійснює перехоплення інформації.

Технічний канал витоку інформації, так само як і канал передавання інформації, складається із джерела сигналу, фізичного середовища його поширення та приймальної апаратури зловмисника.

На рис. 1.5 показано структуру технічного каналу витоку інформації.



Рис. 1.5. **Структура технічного каналу витоку інформації**

Основною ознакою для класифікації технічних каналів витоку інформації є фізична природа носія.

За цією ознакою ТКВІ зазвичай розподіляють на:

оптичні;

радіоелектронні;

акустичні;

матеріально-речові.

Класифікацію технічних каналів (ТК) витоку інформації показано на рис. 1.6.

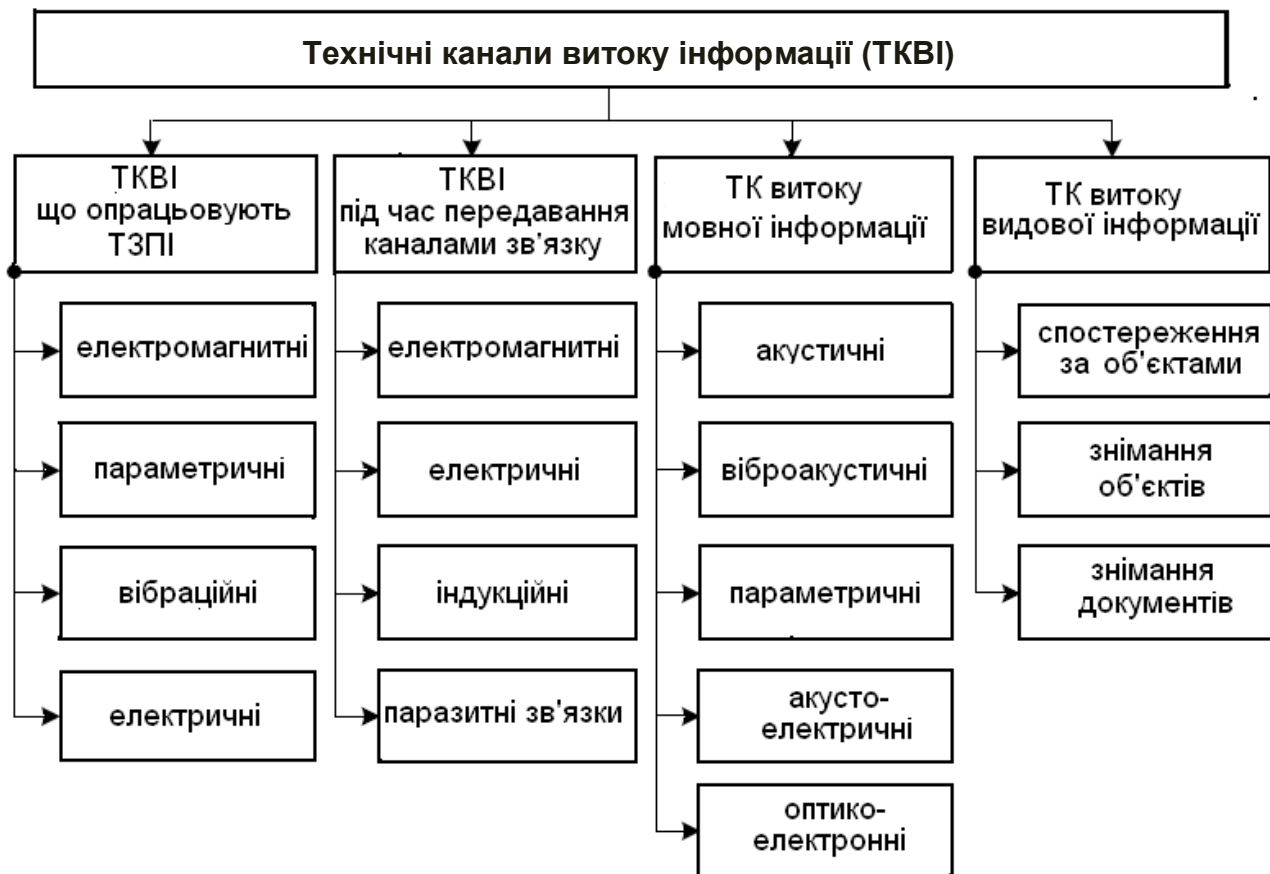


Рис. 1.6. Класифікація технічних каналів витоку інформації

Носієм інформації в оптичному каналі є електромагнітне поле (фотони). Оптичний діапазон розподіляють на:

далекій інфрачервоний піддіапазон 100 – 10 мкм (3 – 30 ТГц);

середній і близький інфрачервоний піддіапазон 10 – 0,76 мкм (30 – 400 ТГц);

видимий діапазон (синьо-зелено-червоний) 0,76 – 0,4 мкм (400 – 750 ТГц).

У **радіоелектронному каналі** витоку інформації як носії використовують електричні, магнітні та електромагнітні поля в радіодіапазоні, а також електричний струм (потік електронів), що поширюється металевими дротами. Діапазон частот радіоелектронного каналу займає смугу частот від десятків ГГц до звукового. Його розподіляють на:

низькочастотний 10 – 1 км (30 – 300 кГц);

середньочастотний 1 км – 100 м (300 кГц – 3 МГц);

високочастотний 100 – 10 м (3 – 30 МГц);

ультрависокочастотний 10 – 1 м (30 – 300 МГц);

до надвисокочастотного 3 – 30 ГГц (10 – 1 см).

Носіями інформації в акустичному каналі є пружні акустичні хвилі, що поширюються в середовищі. Тут розрізняють:

інфразвуковий діапазон 1500 – 75 м (1 – 20 Гц);

нижній звуковий 150 – 5 м (20 – 300 Гц);

звуковий 5 – 0,2 м (300 – 16 000 Гц);

ультразвуковою від 16 000 Гц до 4 МГц.

У **матеріально-речовинному каналі** витік інформації відбувається шляхом несанкціонованого поширення за межі контрольованої зони речових носіїв з інформацією, яку захищають, якими найчастіше є чернетки документів і використаний копіювальний папір.

Побічні електромагнітні випромінювання виникають, унаслідок непередбачуваного схемою технічного засобу передавання інформації паразитними зв'язками напруги, струму, заряду, магнітного поля.

Під *паразитним зв'язком* розуміють зв'язок по електричних або магнітних ланцюгах, що виникає, незалежно від бажання конструктора.

Залежно від фізичної природи елементів паразитних електричних ланцюгів, розрізняють паразитний зв'язок через *загальний повний опір, ємнісний або індуктивний паразитний зв'язок*.

Фізичні явища, що лежать в основі виникнення електромагнітних випромінювань, мають різний характер, але у загальному вигляді витік інформації шляхом побічних випромінювань можна розглядати як ненавмисне передавання секретної інформації деякою "побічною системою зв'язку", що складається з передавача (джерела випромінювань), середовища, у якому ці випромінювання поширюються, і сторони, що приймає.

Джерелами випромінювань у технічних каналах є різні технічні засоби, у яких циркулює інформація з обмеженим доступом:

мережі електроживлення та лінії заземлення;

автоматичні мережі телефонного зв'язку;

системи телеграфного, телекодowego та факсимільного зв'язку;

засоби гучномовного зв'язку;

засоби звуко- та відеозапису;

системи звукопідсилення мовлення;

електронно-обчислювальна техніка;

електронні засоби оргтехніки.

Джерелом випромінювання в технічних каналах витоку інформації може бути й **голосовий тракт людини**, що викликає виникнення небезпечних акустичних випромінювань у приміщенні чи поза ним.

Середовищем поширення акустичних випромінювань у цьому разі є повітря, а за закритих вікон і дверей – повітря та всілякі звукопровідні комунікації.

Утворенню технічних каналів витоку інформації сприяють певні обставини та причини технічного характеру. До них можна зарахувати недосконалість елементної бази та схемних рішень, експлуатаційне спрацювання елементів виробу, а також злочинні дії.

Основними джерелами утворення ТКВІ (рис. 1.7) є такі:

перетворювачі фізичних величин;

випромінювачі електромагнітних коливань;

паразитні зв'язки та наведення на проводи та елементи електронних пристроїв.



Рис. 1.7. Класифікація джерел утворення ТКВІ

Для кожної із цих груп, своєю чергою, можна виконати декомпозицію за принципом перетворення або іншими параметрами.

Так, за принципами перетворення акустичні перетворювачі розподіляють на індуктивні, ємнісні, п'єзоелектричні та оптичні. Водночас за видом перетворення вони можуть бути й акустичними, й електромагнітними. Декомпозицію випромінювачів електромагнітних коливань виконують за діапазоном частот.

Контрольні запитання

1. Із яких просторів застосовують технічні засоби розвідки?
2. Для чого призначено технічні розвідки?
3. За якими ознаками можна класифікувати технічну розвідку?
4. Які види розвідок належать до ознаки, пов'язаної з використанням апаратури або способами ведення розвідки?
5. Що таке "технічний канал витоку інформації"?
6. Яку інформацію здобувають за допомогою технічної розвідки?
7. Що охоплює організація технічної розвідки?
8. За якими принципами здійснюють технічну розвідку?
9. За якими принципами класифікують ТР?
10. Що є основними принципами ведення технічної розвідки?
11. Як розподіляють технічну розвідку за видами?
12. Як розподіляють технічну розвідку за вирішуваними завданнями?
13. Із використанням якого виду та призначення розвідувальної апаратури здійснюють технічну розвідку?
14. За якими показниками використовують класифікацію розвідок на види ("розвідувальні дисципліни") у країнах НАТО?
15. Що є видовою розвідкою?
16. Що називають сигнальною розвідкою?
17. Що називають параметричною розвідкою?
18. Що є носіями інформації?
19. Що використовують для реєстрації інформативних сигналів?
20. За якими принципами перетворення розподіляють акустичні перетворювачі?
21. Як виконують декомпозицію випромінювачів електромагнітних коливань?

2. Фізичні основи захисту від фотографічної й оптико-електронної розвідки

Мета: розглянути основні поняття, фундаментальні принципи оптичної й оптико-електронної розвідки, фізичні основи захисту від фотографічної та оптико-електронної розвідки.

Основні питання

2.1. Основні поняття, принципи оптичної й оптико-електронної розвідки.

2.2. Основи фотометрії.

2.3. Хвильова оптика. Інтерференція й дифракція світла.

2.4. Поширення світла в речовині.

2.5. Основи фотографічної розвідки.

2.6. Оптико-електронна розвідка.

2.7. Основні засоби відеоспостереження та знімання.

Ключові слова: технічна розвідка; оптика, дії світла, візуально-оптичні канали, оптико-електронна розвідка, фотографічна розвідка, типи апаратури реєстрації збереження оптичної інформації, засоби відеоспостереження та знімання.

Професійні компетентності:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

здатність розуміти основні напрями, цілі, фундаментальні принципи оптичної й оптико-електронної розвідки, фізичні основи захисту від фотографічної та оптико-електронної розвідки з погляду захисту інформації.

Рекомендована література [5; 9; 16; 17].

2.1. Основні поняття оптичної й оптико-електронної розвідки

Під оптичною розвідкою розуміють здобування інформації за допомогою оптичних засобів, що забезпечують приймання електромагнітних коливань інфрачервоного, видимого й ультрафіолетового діапазонів, випромєнені або відбиті об'єктами та місцевими предметами.

Оптична розвідка дозволяє вирішувати такі *завдання*:

виявлення об'єктів і визначення їхніх координат;

періодичне спостереження за ходом будівництва об'єктів, із метою визначення їхнього призначення;

визначення виду продукції, що випускають, і виробничої потужності тощо.

Оптичну розвідку розподіляють на: візуально-оптичну та фотографічну.

Візуально-оптичну розвідку (візуальне спостереження) можна використовувати у всіх видах розвідки: космічної, повітряної, морської та наземної.

Візуальне спостереження є також одним з основних способів здійснення розвідки під час дій диверсійно-розвідувальних груп і агентури.

Ефективність його пов'язано з характеристиками зорового сприйняття. Зорові відчуття, що виникають у спостерігача в результаті впливу світла на його зоровий апарат, дозволяють судити про яскравість і колір спостережуваних об'єктів, визначати їхню форму та взаємне розташування, відрізнити об'єкти від навколишнього фону.

Основними характеристиками зору, які суттєво впливають на можливості візуального виявлення маскованих об'єктів, є такі:

спектральна, контрастна та світлова чутливість;

роздільна здатність;

порог глибинного (стереоскопічного) сприйняття.

Знання цих характеристик дозволяє кожного разу оцінювати можливості розвідки спостереженням і виявляти специфічні вимоги, що ставлять до засобів імітації та приховування.

Спектральна чутливість. Око є селективним (вибірним) приймачем променистої енергії: в різних ділянках спектра рівнозначні променисті потоки від об'єктів спостереження сприймають неоднаково, їхня видима яскравість є різною.

Око не реагує на інфрачервоні й ультрафіолетові промені. Воно сприймає випромінювання в ділянках спектра, обмеженій коливаннями хвилі завдовжки від 0,38 до 0,76 мкм. У межах цієї ділянки спектра чутливість очей є неоднаковою. Вона є максимальною для жовто-зелених випромінювань із довжиною хвилі 0,555 мкм і зменшується до нуля на межах видимої ділянки.

Спектральну чутливість зору обчислюють у відносних одиницях і називають *щодою видності*.

До того ж чутливість ока до випромінювань із довжиною хвилі 0,555 мкм приймають за одиницю.

Контрастна чутливість. Під час візуальної розвідки будь-який об'єкт спостерігають на фоні місцевості. Зазвичай, військова техніка й маскувальні конструкції за кольором мало відрізняються від фону. Під час спостереження з великих відстаней колірні відмінності між ними нівелюються,

унаслідок впливу атмосферної димки. Тому часто спостерігач відрізняє замасковані об'єкти від фону тільки за їхньою яскравістю.

Кількісну відмінність у яскравості об'єкта спостереження та фону прийнято характеризувати *контрастом*, що визначають щодою різницею яскравостей. Дослідним шляхом встановлено, що виявлення об'єкта полегшується *в разі збільшення його контрасту з фоном*.

Роздільна здатність зору характеризується кутом мінімальної роздільної здатності 5", тобто, найменшим кутовим розміром об'єкта, його деталей або проміжків між ними, за якого ці об'єкти або деталі ще видно окремо, не зливаючись один з іншим.

Значення мінімального кута роздільної здатності зору залежить від форми об'єктів або деталей і контрасту їх із фоном.

Знання роздільної здатності зору необхідно для визначення розмірів маскувальних конструкцій і маскувальних забарвлень, розрахованих на справляння маскувального ефекту із заданих відстаней, або для розв'язання оберненої задачі – визначення дальності, із якої об'єкт не розпізнають.

Світлова чутливість характеризує властивості ока з виявлення джерел світла та освітлених поверхонь уночі. Необхідна для розрахунку маскувального освітлення та визначення дистанцій, із яких противник уночі може виявити війська й маскувальні об'єкти за світловими демаскувальними ознаками.

Світлову чутливість ока під час виявлення освітлених або поверхонь, які світяться, визначають за найменшою (пороговою) яскравістю, за якої вперше може бути виявлено вночі із заданою вірогідністю (75 %).

Видимість об'єкта під час спостереження вдень залежить від багатьох чинників: контрасту з навколишнім фоном, кутових розмірів і форми об'єкта, часу спостереження. У разі зменшення контрасту, кутових розмірів або часу спостереження видимість об'єктів погіршується.

Час спостереження може змінюватися в широких межах, залежно від того, чи здійснюють розвідку з повітря або Землі.

На практиці прийнято розраховувати на найгірший випадок, коли час спостереження об'єктів необмежено.

Кутові розміри та форма спостережуваних об'єктів впливають лише на одну величину – пороговий контраст зору.

У зв'язку із цим видимість об'єкта, що оцінюють як інтенсивність зорового сприйняття (відчуття) відмінностей об'єкта та фону, прийнято

визначати числом V , яке показує, у скільки разів дійсний контраст більший від граничного контрасту для об'єкта цієї форми та кутових розмірів.

Під час ведення візуального спостереження використовують оптичні прилади, що дозволяють поліпшити видимість об'єктів розвідки та збільшити дальність їхнього виявлення.

Щоб підвищити видимість об'єкта до величини, коли його можна виявити й пізнати, оптичні прилади мають зменшувати величину граничного контрасту та збільшувати контраст об'єкта на навколишньому фоні.

Зазначені завдання вирішують спільним використанням *оптичних приладів та світлофільтрів*.

Основною характеристикою приладів спостереження (біноклів, стереотруб, перископів тощо) є збільшення приладу або його кратність.

Для збільшення величини контрасту об'єкта на навколишньому фоні використовують світлофільтри.

Світлофільтри – це кольорове скло або плівки, прозорі для видимого світла лише в певних ділянках спектра.

Вони дозволяють *збільшувати яскравості й колірні контрасти спостережуваних об'єктів*, унаслідок відмінностей спектральних характеристик об'єкта та фону.

Розрізняють два види світлофільтрів: односмугові й кольоро-контрастні (спектрозональні).

Односмугові світлофільтри прозорі у якійсь одній частині видимого спектра та дозволяють збільшити контраст яскравості.

Кольороконтрастні світлофільтри мають дві смуги прозорості та слугують для підвищення колірною і яскравісного контрасту об'єктів.

Типові характеристики оптичних спостережних приладів наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Основні характеристики оптичних спостережних приладів

Назви	Збільшення	Роздільна здатність, кут. с
Біноклі	7 – 12	8 – 5
Стереотруби	10 – 20	6 – 4
Перископи	10 – 30	5 – 2
Оптичні приціли	2 – 4	15

2.2. Основи фотометрії

Відповідно до ГОСТ 26148-84, світлові величини позначають тими самими літерами, що й відповідні їм енергетичні величини випромінювань. Відрізняються позначення тільки індексами: e – для енергетичних величин і v – для світлових. Але в позначеннях світлових величин індекс v дозволяють опускати в тих випадках, коли це не може призвести до непорозумінь.

2.2.1. Світловий потік

Як відомо під *поток*ом енергії через деяку поверхню розуміють кількість енергії, що пройшла через цю поверхню за одиницю часу.

Для світла вводять аналогічне поняття – *світловий потік*. Під світловим потоком розглядають кількість світлової енергії, яка пройшла через цю поверхню за одиницю часу.

Світловий потік прийнято вимірювати у спеціальних одиницях, названих *люменами*. Як і потік енергії, світловий потік можна вимірювати у ватах.

Світловий потік Φ_v , що випускається ізотропним точковим джерелом світла в межах тілесного кута Ω , на вершині якого розміщено джерело, обчислюють за такою формулою:

$$\Phi_v = I \cdot \Omega, \quad (2.1)$$

де I – сила світла джерела;

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\zeta); \zeta - \text{кут між віссю конуса та його твірною.}$$

Повний світловий потік, що випускається ізотропним точковим джерелом світла, обчислюють так:

$$\Phi_0 = 4\pi I. \quad (2.2)$$

2.2.2. Сила світла

Під *силою світла* розуміють величину світлового потоку, що випромінює точкове джерело в одиничному тілесному куті. Якщо в тілесному куті $d\Omega$ випромінює світловий потік $d\Phi$, то сила світла в цьому напрямку

буде $I = d\Phi / d\Omega$. У загальному випадку сила світла є величиною, що залежить від напрямку. Джерела в цьому разі називають *анізотропними*. У разі, якщо сила світла не залежить від напрямку, джерела є *ізотропними*. Для ізотропних джерел сила світла визначають так:

$$I = \Phi / 4\pi. \quad (2.3)$$

Силу світла будь-якого елемента поверхні *косинусного випромінювача* обчислюють за такою формулою:

$$I = I_0 \cos\varphi, \quad (2.4)$$

де I_0 – сила світла елемента поверхні в напрямку нормалі до цього елемента;

φ – кут між нормаллю до елемента поверхні та напрямком спостереження.

2.2.3. Яскравість

Випромінювання точкового джерела в цьому напрямку характеризується силою світла. Із метою аналогічної характеристики протяжного джерела, вводять поняття сили світла одиниці видимої поверхні – *яскравість*. Яскравість у напрямку визначають величиною світлового потоку, що випромінюється з одиниці видимої в цьому напрямку поверхні в одиницю тілесного кута $d\Omega$. Інакше кажучи, вона чисельно дорівнює силі світла в цьому напрямку, що створюється одиницею площі видимої поверхні джерела. Під видимою площею поверхні, яка світиться, розуміють проєкцію площі поверхні $d\sigma$, що світиться в напрямку, перпендикулярному до осі пучка:

$$B_\varphi = d^2\Phi / (d\Omega d\sigma \cdot \cos\varphi), \quad (2.5)$$

де φ – кут між віссю світлового пучка й нормаллю до поверхні.

Яскравість джерела може бути різною в різних напрямках. Однак зустрічаються джерела світла (Сонце, абсолютно чорні тіла, освітлювана стороннім джерелом матова поверхня та ін.), для яких величина B_φ не залежить від напрямку спостереження, тобто $B_\varphi = B = \text{const}$. У цьому

разі потужність випромінювання, а отже, і сила світла джерела є пропорційними косинусу кута з нормаллю. Подібна залежність потужності випромінювання від φ має назву *закону Ламберта*. Джерела, що підкоряються цьому закону, називають ламбертовими.

2.2.4. Світність

Світність вимірюють величиною повного світлового потоку, що випромінюється з одиниці площі в найрізноманітніших напрямках, тобто:

$$R = d\Phi / d\sigma, \quad (2.6)$$

де $d\Phi$ – світловий потік, який випромінюється із площі всередині тілесного кута 2π .

Світність та яскравість є взаємно пов'язаними фотометричними величинами. Не важко встановити зв'язок між ними:

$$R = 2\pi \int_0^{\pi/2} V_\varphi \cos \varphi \sin \varphi d\varphi. \quad (2.7)$$

Для ламбертових джерел $V_\varphi = V$. Отже, $R = \pi V$. Слід зазначити, що освітлені поверхні, які не є самостійними світловими джерелами, можна формально характеризувати за допомогою введених величин яскравості та світності.

2.2.5. Освітленість

Освітленість E вимірюють відношенням світлового потоку, який падає на цю поверхню, до величини площі поверхні, тобто $E = d\Phi / d\sigma$. З огляду на цю формулу, визначимо освітленість, що створюється точковим джерелом. Будемо вважати потік, що виходить від точкового джерела, рівномірним у всіх напрямках. Оскільки $d\Phi = I d\Omega$ і $d\Omega = d\sigma \cos \varphi / r^2$, то маємо:

$$E = I \cos(\varphi / r^2), \quad (2.8)$$

де φ – кут між зовнішньою нормаллю до поверхні та напрямком світлового потоку (віссю конуса, у межах якого поширюється світлова енергія).

Освітленість є фотометричною величиною, що належить тільки до поверхні, яку освітлюють.

2.2.6. Одиниці вимірювання світлових величин

Людське око по-різному сприймає електромагнітне випромінювання з різними довжинами хвиль. Найкраще око бачить світло в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 555$ нм (жовто-зелене світло). Тому історично було введено спеціальні фотометричні одиниці вимірювання, що відображають сприйняття світла саме людським оком (у різних людей є різною світлочутливість). Як еталон випромінювання було вибрано випромінювання абсолютно чорного тіла за температури затвердіння хімічно чистої платини Pt: $T = 2\,042,5$ К. Випромінювання, що йде нормально до поверхні такого тіла з ділянки площею $1/60$ см² = 1,666 66 мм², створює силу світла в одну **канделу** [1 кд]. Раніше як основну фотометричну величину було прийнято силу світла, яку вимірювали у свічах (св.).

Свіча – $1/60$ сили світла одного квадратного сантиметра повного випромінювача (абсолютно чорного тіла, яке повністю поглинає енергію випромінювання, що падає на нього) за температури затвердіння платини ($2\,042,5$ К) у напрямку нормалі до випромінювальної поверхні.

Кандела – це основна світлотехнічна одиниця. Вона вимірює силу світла, видиму оку (а око той самий предмет, що світиться, у різних умовах бачить по-різному). Для довжини хвилі $\lambda = 555$ нм сила світла 1 кд дорівнює енергетичній силі світла 683 Вт/ср. Енергетичні та світлотехнічні характеристики порівнюють щодо довжини хвилі 555 нм. Для інших довжин хвиль око бачить меншу силу світла. Тому всі світлотехнічні величини, пов'язані із зоровим сприйняттям людини, у всіх фотометричних законах уживають без слова "енергетична" та обчислюють через канделу. Усі інші фотометричні величини є похідними. З огляду на одиницю сили світла, можна визначити одиниці вимірювання інших величин.

Світловий потік $\Phi = \int I d\Omega$ [лм] – люмен – це потік світла в межах тілесного кута в один стерadian із силою світла 1 кд: 1 лм = 1 кд ср.

Світність $R = \frac{d\Phi}{ds}$ [лм/м²] – світловий потік, що приходить з 1 м² поверхні, що світиться (раніше – радлюкси, радфоти).

Освітленість $E = \frac{d\Phi}{ds}$ [1 люкс = 1 лк = 1 лм/м²] (раніше – фот).

Яскравість $B = \frac{d\Phi}{d\Omega ds \cos\theta}$ [кд/м²] – яскравість джерела, кожен квад-

ратний метр поверхні якого має в цьому напрямку силу світла одна кандела (раніше 1 стільб = 1кд/см²).

Люмен – світловий потік, що випромінюється точковим ізотропним джерелом із силою світла, яка дорівнює одній канделі, у тілесний кут величиною один стерadian.

Для вимірювання фотометричних величин в енергетичних одиницях треба перейти від світлового потоку до енергетичного, користуючись відомими співвідношеннями між фотометричними величинами. На практиці доводиться обчислювати світловий потік через одиниці потужності. Через це виникає необхідність установити зв'язок між люменом і ватом.

Слід зазначити, що такий зв'язок через специфічність фізіологічного впливу світла не є універсальним, оскільки світло різних довжин хвиль в однаковому потоці енергії викликає різне зорове відчуття. Чутливість людського ока помітно змінюється, залежно від довжини хвилі випромінювання. Найбільшу чутливість для нормальних очей спостерігають, якщо $\lambda = 555$ нм. Однакова кількість променистої енергії інших довжин хвиль викликає порівняно менше відчуття.

Світло з довжинами хвиль, меншими за 400 нм або більшими за 760 нм, не викликає зорового відчуття, незалежно від інтенсивності. Тому частина шкали електромагнітних хвиль в інтервалі 400 – 760 нм є *видимою ділянкою*. Криву чутливості ока (функцію видності) зображають колоподібною кривою з максимумом $\lambda = 555$ нм, що спадає до нуля в бік червоного та фіолетового світла.

Максимум функції видності, умовно прийнятий таким, що дорівнює одиниці, відповідає $\lambda = 555$ нм. Тому доцільно знайти зв'язок між люменом та ватом за цієї довжини хвилі. Якщо $\lambda = 555$ нм, світловому потоку 1 лм відповідає потужність 0,001 6 Вт або 1 Вт ($\lambda = 555$ нм) = 650 лм. Для встановлення зв'язку з довільною довжиною хвилі у видимій ділянці потрібно користуватися функцією видності v_h , табличні значення якої можна знайти в довідниках: 1 Вт (λ) = 650 v_h лм.

Розділ оптики, присвячений вимірюванню світлових величин, називають **фотометрією**. Є два загальні методи фотометрії:

візуальна фотометрія, у якій для вирівнювання механічними або оптичними засобами яскравості двох полів порівняння використовують здатність людського ока відчувати відмінності у яскравості;

фізична фотометрія, у якій для порівняння двох джерел світла використовують різні приймачі світла іншого роду – вакуумні фотоелементи, напівпровідникові фотодіоди та ін.

В обох методах для того щоб результати мали універсальну значущість, умови спостереження (або роботи приладів) мають бути такими, щоб фотометр реагував на різні довжини хвиль у точній відповідності до "стандартного спостерігача". Важливо також, щоб світловий вихід лампи не змінювався в ході вимірювань. Прилади, пристосовані для вимірювання сили світла або світлових потоків різних джерел, називають *фотометрами*. За принципом реєстрації фотометри бувають двох типів: суб'єктивними (візуальними) й об'єктивними.

В основу **суб'єктивних фотометрів** покладено зорове спостереження. Воно засновано на тому, що відчуття яскравості є монотонною функцією енергії світла, що падає. Для визначення повного світлового потоку застосовують сферичний фотометр. Для досягнення однакової освітленості порівнюваних площин за допомогою двох різних джерел користуються різними приладами та застосовують різні методи. Вибір того чи того методу обумовлено конкретним формулюванням завдання.

Визначення фотометричних величин в **об'єктивних фотометрах** ґрунтується на електричних і фотографічних методах. У фотографічному методі зважають на те, що ступінь потемніння фотоплатівки пропорційний кількості світлової енергії, що падає на неї. Об'єктивні фотометри є вільними від багатьох недоліків, властивих візуальним фотометрам. Перевагою об'єктивного фотометра є можливість його використання також у невидимій ділянці спектра (ультрафіолетовій та інфрачервоній). Тому їх значно ширше використовують на практиці.

2.3. Хвильова оптика. Інтерференція й дифракція світла

2.3.1. Загальні відомості про хвильові властивості світла

Розділ оптики, у якому досліджуються явища поширення світла як електромагнітної хвилі та його взаємодії із речовиною із хвильової точки зору, називають **хвильовою оптикою**.

Зробимо загальний огляд учення про електромагнітні хвилі, узявши за основу їхньої класифікації довжину хвилі. Теорія електромагнітних хвиль охоплює безліч фізичних явищ, між якими, на перший погляд, немає прямої схожості.

Електромагнітні хвилі, які вимірюють від тисяч метрів до часток міліметра, вивчає радіотехніка. Такі хвилі можна генерувати штучно за допомогою радіотехнічних приладів, в основу яких покладено коливальний контур, що є поєднанням ємності та індуктивності. Проте атоми та молекули також випромінюють радіохвилі, і цю властивість широко використовують в радіоастрономії. Хвилі всіх інших діапазонів (окрім радіо) можуть бути утворені тільки шляхом використання природних генераторів, якими є молекули, атоми, ядра атомів та окремі елементарні частинки. В узагальненому вигляді випромінювачем електромагнітних хвиль є прискорено рухомий електричний заряд. В атомах і ядрах заряджені частинки рухаються із прискоренням, тому вони і є випромінювачами електромагнітних хвиль.

За *радіотехнічним діапазоном* іде діапазон теплових або інфрачервоних хвиль. Ці хвилі випромінюються переважно шляхом коливань атомів у молекулах. Їх називають тепловими тому, що коливання молекул зазвичай викликані тепловим зіткненням молекул. Чим вищою є температура тіла, тим із більш високими частотами здійснюють коливання молекули. Довжина хвилі інфрачервоних хвиль зменшується зі зростанням температури тіл. Інфрачервоні промені генеруються нагріванням тіл і їх реєструють прикладами, базованими на теплових явищах. Зазвичай використовують термопару.

За *інфрачервоними променями* йде видиме світло, що заповнює щодо вузький діапазон: $7,6 \times 10^{-7} - 4 \times 10^{-7}$ м. Видимі промені може бути зареєстровано (крім сприйняття очима) багатьма способами: тепловими, фотографічними та фотоелектричними. Випромінюють видиме світло не молекули, а окремі збуджені атоми. Це, можна сказати, атомарне світло.

До *атомарного світла* належать прилеглі до видимих, тобто щодо довгі, *ультрафіолетові хвилі*. Загальний діапазон довжини хвиль ультрафіолетових променів є досить широким: від фіолетової межі видимих променів до 10^{-9} м. Ультрафіолетові промені реєструють також тепловими, фотографічними та фотоелектричними методами.

За ультрафіолетовими променями йдуть *рентгенівські промені*, діапазон довжини хвиль яких становить від $10^{-9} - 10^{-12}$ м.

Рентгенівські промені випромінюються або шляхом взаємодії швидких електронів з атомами та ядрами атомів (у рентгенівських трубах, наприклад), або шляхом випромінювання ядер атомів, коли останні є попередньо збудженими. Рентгенівські промені реєструють фотографічними та фотоелектричними методами.

За рентгенівськими променями, перекриваючи їх, ідуть *гамма-промені*, випромінювані порушеними ядрами атомів, а також шляхом взаємодії та перетворення елементарних частинок.

Стислий огляд електромагнітних хвиль показує, що загальне вчення про електромагнітні хвилі охоплює й поєднує багато розділів фізики: від радіотехніки до ядерної фізики та фізики елементарних частинок.

Відомо, що атомна фізика та фізика атомного ядра потребує квантових теорій, тоді як електротехніка обмежується класичною електродинамікою. Подібна подвійність опису істотно позначиться й на вченні про електромагнітні випромінювання, тому обмежимося класичною хвильовою оптикою, яка дозволяє пояснити більшість спостережуваних явищ, зокрема дисперсію, інтерференцію та дифракцію світла.

2.3.2. Дисперсія світла

Дисперсією світла або, як говорять, **дисперсією речовини**, щодо світлових хвиль називають залежність її абсолютного показника заломлення n від частоти ω і, відповідно, від довжини його хвилі $n = n(\omega)$. Дисперсією світла називають також розкладання світла у спектр, що спостерігають у ході його заломлення, інтерференції або дифракції. Промінь білого кольору, у якому міститься весь безперервний спектр видимих світлових хвиль, із заломленням на призмі (завдяки залежності її показника заломлення n від довжини хвилі λ) розгортається в дисперсійний спектр – набір різнокольорових смуг. Зміна кольорів у спектрі відбувається безперервно. Умовно його розподіляють на сім основних кольорів (за аналогією з музичною гаммою із семи звукових нот) у порядку зростання кута заломлення: червоний, помаранчевий, жовтий, зелений, блакитний, синій і фіолетовий. Кожному із цих кольорів відповідає свій діапазон довжин хвиль, наведений у табл. 2.2.

Основні кольори та відповідні їм діапазони довжин хвиль

Кольори	λ , нм	Додаткові кольори
Червоний	770 – 647	Блакитно-зелений
Помаранчевий	647 – 587	Блакитний
Жовтий	587 – 536	Синій
Зелений	536 – 492	Пурпуровий
Блакитний	492 – 454	Помаранчевий
Синій	454 – 426	Жовтий
Фіолетовий	426 – 393	Жовто-зелений

Зі змішуванням усіх кольорів спектра, утвореного розкладанням білого світла за допомогою призми, знову створюється біле світло. Водночас якщо в суміш не додати якогось кольору, ця суміш теж буде мати якийсь колір, що можна назвати додатковим до того, який було недодадено. Експериментально було підібрано поєднання додаткових кольорів, наведених у табл. 2.2. Як кількісну характеристику дисперсії речовини щодо видимого світла можна взяти різницю кутів заломлення променів, що відповідають крайнім кольорам дисперсійного спектра: фіолетового $\delta_{\text{фіол}}$ і червоного $\delta_{\text{черв}}$: $D = \delta_{\text{фіол}} - \delta_{\text{черв}}$. Величина D характеризує дисперсію лише інтегрально. Для більш точного її оцінювання необхідно брати відношення різниці показників заломлення речовини для різних довжин хвиль і різниці цих довжин $\Delta\lambda$: $\frac{\Delta n}{\Delta\lambda}$ або в диференціальній формі: $\frac{dn}{d\lambda}$.

Оскільки показник заломлення речовини залежить від довжини заломленого ним світла, у довідниках зазвичай наводять його значення для жовтої лінії натрію $\lambda_D \approx 0,589$ мк і позначають символом n_D . Вигляд спектра обумовлено характером і властивостями джерела світла та речовини, через яке він проходить. Розрізняють три основні різновиди спектрів: суцільні, лінійчасті та смугасті спектри.

Лінійчастий спектр – це декілька різко окреслених кольорових ліній (із широкими темними проміжками між ними), які відповідають певним

довжинам хвиль. Темні проміжки відповідають відсутності цілих діапазонів довжин хвиль у випромінюванні. Лінійчастий спектр випромінюється окремими атомами, що не взаємодіють між собою, за умови їхніх переходів (переходів їхніх електронів) зі збуджених станів у незбуджені.

Смугастиий спектр відрізняється від лінійчастого безліччю широких ліній, кожна із яких є сукупністю близько розташованих вузьких кольорових ліній. Він випромінюється розрідженим газом у збудженому стані, як і лінійчастий спектр. Але в цьому разі газ є багатоатомним, і спектр випромінюється молекулами та їхніми атомами, які не взаємодіють між собою.

У *суцільному спектрі*, який є ідеалізацією, наявні всі довжини хвиль, тому перехід від одного кольору до іншого відбувається безперервно. Такий спектр випромінюється сукупністю атомів і молекул, що взаємодіють між собою за високих температур.

2.3.3. Інтерференція світла

Явище утворення смуг, що чергуються посиленням та ослабленням інтенсивності світла, називають **інтерференцією**. Більш точний опис інтерференції будь-яких хвиль – це не просто їхнє взаємне посилення або ослаблення в різних точках у якийсь певний момент часу, а незмінна, стаціонарна така картина, що триває досить довго. Інтерференцію світла спостерігають у спеціальних умовах під час накладання один на одного двох або більшої кількості пучків світла. Окремим випадком інтерференції хвиль (а інтерференція є суто хвильове явище і має місце не тільки для світлових хвиль) є *стояча хвиля*. У стоячій хвилі спостерігають пучності (максимумами інтенсивності) та вузли (мінімуми інтенсивності), що чергуються один з одним у правильному порядку. Стояча хвиля утворюється шляхом накладання на спадну хвилю хвилі, відбитої від будь-якої перешкоди.

Для утворення стаціонарної інтерференційної картини необхідно, щоб у кожній точці простору різниця фаз хвиль, що накладаються від різних джерел коливань, зберігалася б незмінною. Тому основною умовою спостереження інтерференції хвиль є їхня **когерентність**. Під когерентністю розуміють погодженість хвиль одна з одною за фазою. Інтерференцію будуть спостерігати за умови, коли хвилі, що накладаються одна на одну в кожній точці світлового поля, мають постійну в часі різницю

фаз. Якщо ця різниця фаз дорівнює парному числу π , то буде максимум; якщо непарному числу π , то буде мінімум інтенсивності світла. Хвилі з постійною різницею фаз називають **когерентними**.

Світло, що випромінюється природними джерелами, є некогерентним, оскільки воно хаотично випромінюється різноманітними атомами, між якими немає ніякої погодженості. Забезпечити когерентність двох різних джерел є практично неможливим.

Як можна спостерігати інтерференцію? Загальне та перше правило спостереження інтерференції світла таке: необхідно світловий пучок, що йде від одного джерела, якимось чином розподілити на два або на більшу кількість пучків (ці пучки будуть когерентними між собою), а потім примусити їх накладитися один на одного. Тобто треба штучно створити віртуальні джерела когерентних хвиль. *Максимуми інтенсивності* хвилі будуть спостерігати в точках, де виконано умову $\Delta\varphi = 2m\pi$, *мінімуми* – у точках, де $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$. У формулах через $\Delta\varphi$ позначено різницю фаз хвиль, що додаються, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Реалізувати ідею роздвоєння одного джерела світла можна, наприклад, за допомогою екрана із двома отворами в ньому. Джерело світла S , відповідно до принципу Гюйґенса – Френеля, створює в отворах екрана два вторинні джерела світла S_1 і S_2 , когерентність яких є очевидною. Можливий також інший спосіб створення віртуальних когерентних джерел світла за допомогою одного джерела та дзеркал Френеля, розташованих одне щодо того під кутом близько 180° . Тут когерентними джерелами світла є зображення S_1 і S_2 реального джерела S у двох дзеркалах. Інтерференцію світла можна спостерігати також за допомогою біпризми Френеля: дві скляні призми з малим заломним кутом θ виготовляють з одного шматка скла так, що призми складено своїми основами; джерелом світла є яскраво освітлена щілина S . Після заломлення біпризموю пучок, що спадає, розщеплюється на два, які виходять від уявних джерел S_1 і S_2 і дають дві когерентні циліндричні хвилі. Оскільки заломлений кут θ є малим, то всі промені відхиляються кожною з половинок біпризми на один і той самий кут φ . Можна показати, що в цьому разі $\varphi = (n - 1)\theta$, де n – показник заломлення матеріалу призми. Відстань між джерелами: $d = 2a \sin \varphi$.

Розглянемо приклад інтерференції – дослід Юнга. Припустимо, що світло від лампочки S зі світлофільтром, який створює практично

монохроматичне світло, проходить через дві вузькі, поряд розташовані щілини, за якими встановлено екран (рис. 2.1). На екрані будуть спостерігати систему світлих і темних смуг – *смуг інтерференції*. У цьому разі єдина світлова хвиля розбивається на дві, що йдуть від різних щілин. Ці дві хвилі є когерентними між собою і з накладанням одна на одну дають систему максимумів та мінімумів інтенсивності світла у вигляді темних і світлих смуг відповідного кольору.

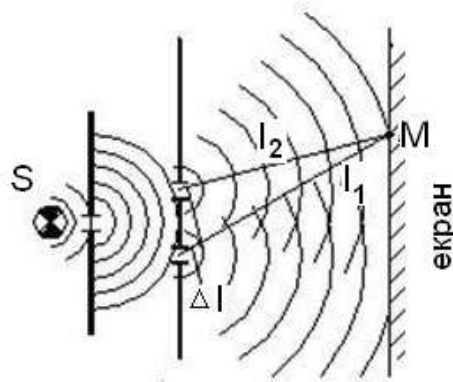


Рис. 2.1. Приклад інтерференції

Визначимо, де виникне максимум і де – мінімум. Розглянемо якусь точку екрана М. Проведемо від щілин як від вторинних когерентних джерел промені, що сходяться в одній точці. Визначимо різницю ходу цих променів – відрізок $\Delta l = l_2 - l_1$. Якщо на ньому поміщається парне число напівхвиль (напівхвилі відповідає різниця фаз π), то хвилі від щілин у точці М складуться в однаковій фазі, будуть спостерігати максимум. Якщо на відрізку Δl поміщається непарне число півхвиль, то вони складуться у протифазі; будуть спостерігати мінімум. Отже, умови спостереження максимумів і мінімумів можна подати, відповідно, так:

$$\Delta l = 2m \frac{\lambda}{2} \text{ (умова максимуму); } \Delta l = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ (умова мінімуму). (2.9)}$$

Інтерференційні хвилі можуть проходити через різні середовища та, як наслідок, мати різні фазові швидкості. У цьому разі замість геометричної різниці ходу потрібно говорити про так звану *оптичну різницю ходу*.

У формулах під λ слід розуміти *довжину хвилі світла в цьому середовищі*. Якщо позначити довжину тієї самої хвилі у вакуумі через λ_B , то $\lambda_B = \lambda/n$.

Якщо інтерференційні хвилі проходять через різні середовища, показники заломлення котрих n_1 і n_2 , то умови екстремумів потрібно записати так:

$$\Delta l = n_1 l_1 - n_2 l_2 = 2m \frac{\lambda}{2} \text{ (максимум);} \quad (2.10)$$

$$\Delta l = n_1 l_1 - n_2 l_2 = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ (мінімум),} \quad (2.11)$$

де nl – оптична довжина шляху променя;

$\Delta l = n_1 l_1 - n_2 l_2$ (іноді позначають просто Δ) – оптична різниця ходу променів.

Отже, максимуми інтерференції спостерігають у точках, для котрих різниця ходу дорівнює парному числу півхвиль, а мінімуми – у точках, для котрих на оптичній різниці ходу поміщається непарне число напівхвиль.

Передбачено, що щілини для вторинних хвиль є нескінченно вузькими. Кінцева ширина щілин призводить до розмивання максимумів і мінімумів. На досить широких щілинах максимуми будуть перекриватися, інтерференцію не будуть спостерігати. Відіграє роль і відстань між щілинами: чим вона є вужчою, тим ширшою картина інтерференції.

Інтерференцію можна спостерігати і в білому, тобто немонахроматичному, світлі. У цьому разі кожна смуга буде райдужно забарвленою: інтерференція супроводжується розкладанням світла на монохроматичні складові (чим більшим є λ , тим на більш довгій відстані відстоять максимуми один від одного).

У разі використання білого світла будуть спостерігати накладання картин інтерференції для всіх довжин хвиль світла видимого діапазону. Це призведе до ліквідації темних смуг дифракційної картини на екрані, а також розширення освітлених смуг та їхнього періодичного фарбування. Тоді на кожному періоді фарбування освітлених смуг буде подібне до дисперсійного спектру розкладання білого світла на клини, однак у зворотному порядку щодо довжини хвилі.

У дисперсійному спектрі, як відомо, найменше відхиляється найдовша хвиля світла з видимого спектра – червона, найбільше – найкоротша із хвиль – фіолетова.

В інтерференційному спектрі центральна освітлена смуга буде незабарвленою, а в інших смугах найменше відхилиться від центру інтерференційної картини хвиля з найкоротшою із хвиль, відповідна фіолетовому кольору, найдовша з видимих хвиль – червона.

Інтерференційні кольорові явища спостерігають також у відбиванні світла від тонких прозорих плівок (наприклад, від мильних плівок, плівок бензину на поверхні води). Падіння променів під невеликими кутами на плівку, нанесену на оптично більш щільне середовище, має практичний інтерес для конструювання безвідбиваних фотооб'єктивів із максимальним проходженням світлової енергії у фотокамеру. Такі об'єктиви з нанесеною тонкою плівкою називають *просвітленою оптикою*.

Якщо товщина плівки, на яку падає світло, змінюється, то за найменшого зміщення спостерігача він під тим самим кутом буде бачити на її поверхні чергування світлих і темних плям. Зокрема, якщо перетин плівки клиноподібний, її поверхня здається спостерігачеві покритою темними та світлими смугами, паралельними ребру клину.

Кільця Ньютона є історично першим прикладом спостереження інтерференційної картини смуг однакової товщини. Геометрія спостереження цих кілець є надзвичайно простою (рис. 2.2). Кільця Ньютона – кільцеподібні інтерференційні максимуми та мінімуми, що виникають навколо точки дотику злегка зігнутої опуклої лінзи, сферична поверхня якої має великий радіус кривизни, і плоскопаралельної платівки під час проходження світла крізь лінзу та платівку. Якщо на систему падає пучок світла 1, то промені, відбиті від верхньої й нижньої меж повітряного проміжку (не показані на рис. 2.2), будуть інтерферувати. Смуги мають вигляд світлих і темних кілець, що чергуються, спадної ширини із центром у точці дотику поверхонь O . Унаслідок зміни фази на π у ході відбивання від плоскої скляної поверхні B_1 B_2 , центр інтерференційної картини виявляється темним (геометрична різниця ходу дорівнює нулю). Такі інтерференційні смуги вперше спостерігав Р. Гук, а І. Ньютон установив залежність розмірів кілець від кривизни лінзи.

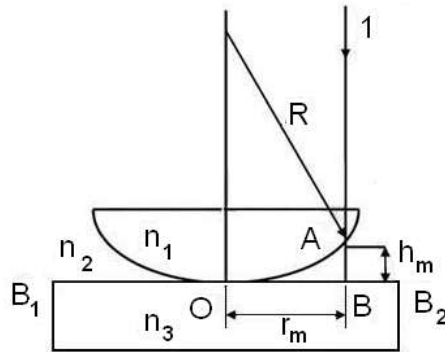


Рис. 2.2. Розрахунок радіуса кілець Ньютона.
B₁ B₂ – верхня плоска поверхня скляної пластини

Легко розрахувати радіуси кілець Ньютона. Нехай R – радіус кривизни опуклої поверхні лінзи. Товщина проміжку h_m відповідає кільцю з порядком m (пов'язана з радіусом цього кільця r_m); якщо обмежитися першими двома членами розкладання до ряду Тейлора $r_m^2 \ll R^2$, визначеного

співвідношенням $h_m = R - \sqrt{R^2 + r_m^2} \approx \frac{r_m^2}{2R}$. За приблизно нормального па-

діння світла та малого нахилу поверхні лінзи до поверхні платівки умова створення інтерференційних смуг, якщо повітря ($n \approx 1$), має вигляд

$$2h_m + \frac{\lambda}{2} = m\lambda. \text{ Тоді для радіусів кілець визначаємо } r_m^2 = R\lambda\left(m - \frac{1}{2}\right),$$

де $m = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2} \dots$ – для темних кілець і $m = 0, 1, 2, \dots$ – для світлих кі-

лець. Видно, що, наприклад, радіуси темних кілець є пропорційними квадратному кореню з позитивних цілих чисел, а відстань між сусідніми кільцями зменшується зі збільшенням порядку інтерференційних смуг. Вимірюючи радіуси кілець, які відповідають різним порядкам, i , знаючи довжину хвилі світла, можна визначити радіус кривизни лінзи зі співвід-

ношення $R = \frac{r_{m+\Delta m}^2 - r_m^2}{\Delta m \lambda}$, де Δm – зміна порядку інтерференційних смуг.

У разі освітлення світлом, що містить дві квазімонохроматичні компоненти із близькими довжинами хвиль λ_1 і $\lambda_2 > \lambda_1$, кожна компонента утворює свою інтерференційну картину. У міру віддалення від центра інтерференційні кільця від різноманітних компонент світла розходяться. У результаті перекриття кілець різних порядків виникають періодичні зміни "видності"

інтерференційної картини (вузли та пучності або світлові відбивання). Перше від центра розмивання відбувається тоді, коли радіус світлого кільця порядку m для довжини хвилі λ_1 збігається з радіусом темного кільця порядку $(m - 0,5)$ для довжини хвилі λ_2 . Звідси випливає, що $\lambda_2(m - 1/2) = \lambda_1 m$. Оскільки кожне кільце має помітну ширину і в ньому відбувається плавний перехід від максимуму до мінімуму, тому ділянка розмивання має деяку протяжність. Очевидно, що з умови виникнення другого розмивання виходить $\lambda_2(m' - 1/2) = \lambda_1(m' + 1)$. Тоді визначаємо, що $\Delta m = m' - m = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$,

де Δm – зміна порядку інтерференційних смуг між сусідніми розмитими ділянками.

З освітленням білим світлом кільця стають забарвленими, а кількість спостережуваних кілець є невеликою. Причина в тому, що за великих m відбувається настільки складне накладання кілець хвиль різних довжин, що інтерференційна картина зникає; крім того, на білому світлі легко порушується умова часової когерентності.

Кільця Ньютона використовують для вимірювання радіусів кривизни поверхонь, вимірювання довжин хвиль світла та показників заломлення. У деяких випадках кільця Ньютона є небажаним явищем.

Застосування інтерференції є важливими та численними. Є спеціальні прилади – *інтерферометри*, дію яких засновано на явищі інтерференції. Призначення їх може бути різним: точне вимірювання довжин світлових хвиль, вимірювання показника заломлення газів та інших речовин. Є інтерферометри спеціального призначення. За допомогою інтерференції можна оцінити якість оброблення поверхні виробу з точністю до $1/10$ довжини хвилі, тобто з точністю до 10^{-6} см. Для цього потрібно створити тонкий клиноподібний прошарок повітря між поверхнею зразка та дуже гладкою еталонною платівкою. Тоді нерівності поверхні розміром до 10^{-6} см призведуть до помітного викривлення інтерференційних смуг, що утворюються під час відбивання світла від перевірюваної поверхні та нижньої межі еталонної платівки.

Об'єктиви сучасних фотоапаратів і кінопроекторів, перископи підводних човнів і різні інші оптичні пристрої складаються з великої кількості оптичних стекол – лінз, призм тощо. Проходячи через такі пристрої, світло відбивається від багатьох поверхонь. Кількість відбивальних поверхонь

у сучасних фотооб'єктивах перевищує 10, а в перископах підводних човнів досягає 40.

За умови падіння світла перпендикулярно поверхні частка відбитої від неї енергії становить 5 – 9 % від усієї енергії. Тому крізь прилад часто проходить усього 10 – 20 % світла, що надходить у нього. У результаті цього освітленість зображення буде малою. Крім того, погіршується якість зображення. Частина світлового пучка після багаторазового відбивання від внутрішніх поверхонь проходить через оптичний прилад, але розсіюється і вже не бере участі у створенні чіткого зображення. На фотографічних зображеннях, наприклад, через це утворюється "вуаль". Для усунення цих хиб відбивання світла від поверхні оптичних стекел треба зменшити частку відбитої енергії світла. Зображення, створюване приладом, стає яскравішим, "просвітлюється". Звідси й термін *просвітлення оптики*.

Просвітлення оптики засновано на інтерференції. На поверхню скла, наприклад лінзи, наносять тонку плівку з показником заломлення n_p , меншим за показник заломлення скла n_c .

Одношарове просвітлення часто використовують для лазерної оптики, розрахованої на роботу у вузькому спектральному діапазоні.

Багатошарові просвітлювальні покриття характеризуються низькими втратами на відбиття (вузькосмугові покриття для лазерної оптики з відбивною здатністю близько 0,2 % і меншою, широкосмугові – до 0,5 %).

Основна перевага багатошарового просвітлення сучасної фотографічної та спостережувальної оптики – низька залежність відбивної здатності від довжини хвилі в межах видимого спектра, що істотно зменшує спотворення кольору.

2.3.4. Дифракція світла

Дифракція (від лат. *diffractus* – заломлений) – будь-які відхилення у процесі поширення хвиль (світла) від законів геометричної оптики, тобто загинання світла в ділянку геометричної тіні.

Причина дифракції, як і інтерференції, – суперпозиція хвиль, яка приводить до перерозподілу інтенсивності.

Якщо кількість інтерференційних джерел скінченна, то говорять про інтерференцію хвиль. За умови безперервного розподілу джерел – про *дифракцію хвиль*.

Дифракція виявляється у хвилях будь-якої природи. Дифракцію світла може бути пояснено тільки із хвильового погляду. Вона призводить до того, що замість різкої межі між світлом і тінню (як це впливає з геометричної оптики) створюється розмита, складним чином освітлена ділянка.

Якщо λ – довжина хвилі, b – розміри перешкоди, L – відстань від перешкоди до точки спостереження, то розрізняють такі ситуації: $b^2 / L\lambda \gg 1$ – геометрична оптика, $b^2 / L\lambda = 1$ – дифракція Френеля, $b^2 / L\lambda \ll 1$ – дифракція Фраунгофера.

Точне розв'язання будь-якої дифракційної задачі для світлових хвиль зведено до обчислення розв'язку рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами.

В оптиці велике значення має наближене розв'язання дифракційних задач, засноване на принципі Гюйґенса – Френеля:

1) кожна точка, до якої доходить хвиля, є джерелом вторинних сферичних хвиль, обвідна яких дає положення хвильового фронту в наступний момент часу (Х. Гюйґенс);

2) амплітуду результативної хвилі в будь-якій точці простору може бути визначено як результат інтерференції всіх вторинних хвиль з урахуванням їхніх фаз та амплітуд (О. Френель).

2.3.4.1. Математичне формулювання принципу Гюйґенса – Френеля

Нехай S – хвильова поверхня, не закрита перешкодою; P – точка спостереження. Тоді елемент поверхні dS збудить у точці P коливання:

$$dE = k(\varphi) \frac{a_0 dS}{r} \cos(\omega t - kr + \alpha_0). \text{ Результівне коливання має такий}$$

$$\text{вигляд: } E = \int_S dE = \int_S k(\varphi) \frac{a_0 dS}{r} \cos(\omega t - kr + \alpha_0) dS, \text{ де } k(\varphi) \text{ визначає залеж-}$$

ність амплітуди dE від кута між нормаллю до площадки dS і напрямком на точку P , множник a_0 дає амплітуду світлового коливання в тому місці, де перебуває dS , величини ω і k – колова частота та хвильове число сферичної хвилі, що поширюється від елемента dS .

Обчислення інтеграла в загальному вигляді – це важке завдання. У випадках, якщо в задачі наявна симетрія, амплітуду результативного

коливання можна визначити методом зон Френеля, не вдаючись до обчислення інтеграла.

Нехай від джерела світла S (рис. 2.3) поширюється монохроматична сферична хвиля, P – точка спостереження. Через точку O проходить сферична хвильова поверхня. Вона симетрична щодо прямої SP . Розподілимо цю поверхню на кільцеві зони I, II, III тощо так, щоб відстані від країв зони до точки P відрізнялися на $\frac{\lambda}{2}$ – половину довжини світлової хвилі. Цей розподіл було запропоновано О. Френелем, і зони називають *зонами Френеля*.

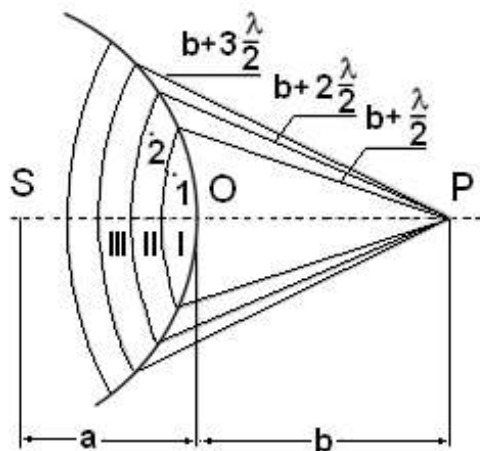


Рис. 2.3. Формулювання принципу Гюйгенса – Френеля

Що дає такий розподіл для розрахунку інтенсивності в точці P ? Візьмемо довільну точку 1 у I зоні Френеля. У II зоні за правилом побудови зон міститься така відповідна їй точка, що різниця ходу променів, що йдуть у точку P від точок 1 і 2, буде дорівнювати $\frac{\lambda}{2}$. Унаслідок цього коливання від точок 1 і 2 взаємно погасяться в точці P .

Із геометричних міркувань випливає, що за не дуже великих номерів зон їхні площі є приблизно однаковими. Значить, кожній точці I зони відповідає їй точка у II, коливання яких взаємно погасяться. Амплітуда результтивного коливання, що приходить у точку P від зони з номером m , зменшується зі зростанням m , тобто $A_1 > A_2 > A_3 \dots A_{m-1} > A_m > A_{m+1} \dots$. Відбувається це через збільшення зі зростанням m кута між нормаллю до хвильової поверхні та напрямком на точку P . Отже, гасіння коливань сусідніх зон буде не зовсім повним.

2.3.4.2. Дифракція Френеля на круглому отворі

Нехай на шляху сферичної світлової хвилі, що випускається джерелом S , розташований непрозорий екран із круглим отвором радіуса r_0 . Якщо отвір відкриває парне число зон Френеля, то в точці P будуть спостерігати мінімум, оскільки всі відкриті зони можна об'єднати в сусідні пари, коливання яких у точці P приблизно гасять одна одну. Із непарного числа зон у точці P буде максимум, оскільки коливання однієї зони залишаться не погашеними. Радіус зони Френеля з номером m за не дуже великих m : $r = \sqrt{abm\lambda / (a + b)}$. Відстань a приблизно дорівнює відстані від джерела до перешкоди, відстань b – від перешкоди до точки спостереження P . Якщо отвір залишає відкритим ціле число зон Френеля, то, прирівнявши r_0 і r_m , визначаємо формулу для підрахунку числа відкритих зон Френеля $m = \frac{r_0^2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$. За парним числом у точці P буде мінімум інтенсивності, за непарним – максимум.

2.3.4.3. Дифракція Фраунгофера на щілині

У разі дифракції Фраунгофера параметр $b^2 / (L\lambda) \ll 1$. Це означає, що якщо розмір перешкоди $b \sim \lambda$, то відстань до екрана спостереження $L \gg b$.

Нехай на довгу щілину шириною b падає плоска монохроматична хвиля з довжиною λ . Помістимо між щілиною та екраном спостереження лінзу так, щоб екран спостерігача перебував у фокальній площині лінзи. Лінза дозволяє спостерігати на екрані дифракцію в паралельних променях ($L \rightarrow \infty$).

Збиральна лінза має властивість *тавтохронності*: промені, що йдуть від хвильової поверхні AC до точки спостереження P , мають однакову оптичну довжину. Отже, результат суперпозиції вторинних хвиль, який визначає амплітуду коливань світлової хвилі в точці P , залежить від різниці ходу, що набігає у трикутнику ABC .

Для визначення положень максимумів і мінімумів інтенсивності скористаємося методом зон Френеля: спочатку розподілимо сторону BC на відрізки довжиною $\frac{\lambda}{2}$ (рис. 2.4).

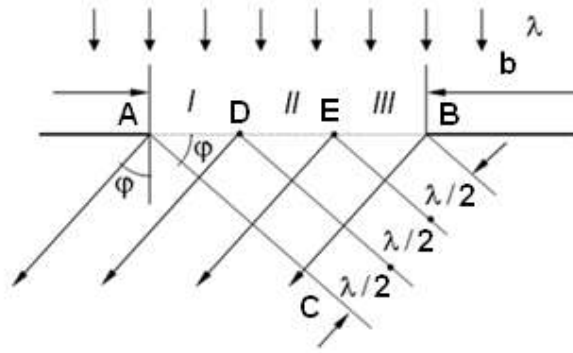


Рис. 2.4. **Визначення дифракції Фраунгофера на щілині**

Із кінців цих відрізків проведемо лінії, паралельні фронту вторинної плоскої хвилі, що йде під кутом φ . Ці лінії розподіляють АВ – фронт первинної плоскої хвилі – на зони Френеля. На рис. 2.4 їх зображено три: AD, DE і EB. Число зон Френеля k залежить від λ і довжини відрізка BC = $b \sin \varphi$. Якщо k ціле число, то $b \sin \varphi = k \frac{\lambda}{2}$. Із парним числом зон Френеля $k = 2m$, де $m = \pm 1, \pm 2 \dots$ зони можна розподілити на сусідні пари, які гасять одна одну.

Отже, умова мінімуму щодо дифракції Фраунгофера на щілині має такий вигляд: $b \sin \varphi = m\lambda$, $m = \pm 1, \pm 2 \dots$

За непарного числа $k = 2m + 1$ одна зона залишається без пари, і її коливання не буде погашено. Отже, умова максимуму для дифракції Фраунгофера на щілині буде мати такий вигляд: $b \sin \varphi = m\lambda + \frac{\lambda}{2}$.

Звернемо увагу, що умови формально протилежні умовам максимумів і мінімумів з інтерференцією від двох джерел.

Залежність інтенсивності дифракційної картини від кута дифракції φ має такий вигляд:

$$I_{\text{щ}}(j) = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin j \right) \left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin j \right)^2, \quad (2.12)$$

де I_0 – інтенсивність за $\varphi = 0$.

Графік цієї функції в осях $I - \sin\varphi$ має такий вигляд (рис. 2.5).

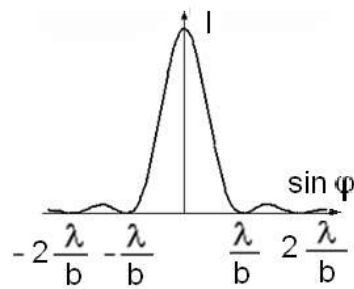


Рис. 2.5. Залежність інтенсивності дифрагованого світла від кута φ

2.3.4.4. Дифракційні ґратки

Дифракційна ґратка – це сукупність великої кількості однакових щілин, віддалених одна від одної на ту саму відстань. Відстань d між відповідними точками сусідніх щілин називають *періодом ґратки*: $d = a + b$. Можна визначити вираз для інтенсивності I_p результативного коливання, що створюється ґраткою для кута φ , у такому вигляді:

$$I_p(\varphi) = I_0 \left[\frac{\sin^2\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right)^2} \right] \cdot \left[\frac{\sin^2\left(N\pi \frac{d}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\sin^2\left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \varphi\right)} \right]. \quad (2.13)$$

Можна формально визначити умови, за яких будуть спостерігати мінімуми, якщо проаналізувати на мінімум цей вираз.

У якісних ґрат $d \approx 10^{-6}$ м і за довжини ґратки $l_p = 1$ см кількість щілин $N = \frac{l_p}{d} = 10\,000$, що дає дуже вузькі головні максимуми, необхідні у спектральних приладах.

Графік залежності інтенсивності дифракційної картини від $\sin\varphi$ (для $N = 4$) зображено на рис. 2.6 суцільною лінією. Штрихова лінія – обвідна дифракційної картини – це інтенсивність дифракційної картини від однієї щілини, помножена на $N^2 = 16$.

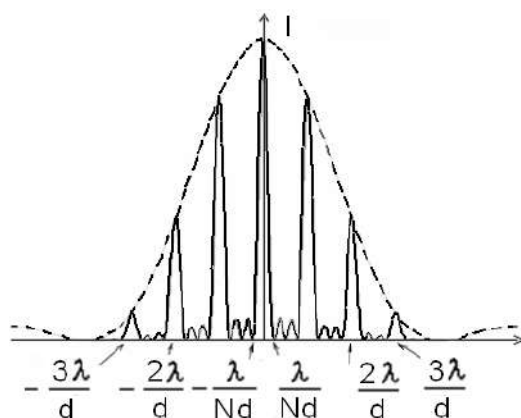


Рис. 2.6. Залежність інтенсивності дифракційної картини від $\sin\varphi$

2.3.4.5. Поняття про голографію

Голографія (від грец. *ὅλος* – *holos* – "повний запис") – це особливий спосіб запису та подальшого відновлення хвильового поля, заснований на реєстрації інтерференційної картини. Вона зобов'язана своїм виникненням законам хвильової оптики – законам інтерференції й дифракції. Цей принципово новий спосіб фіксації та відтворення просторового зображення предметів винайдено угорським фізиком Д. Габором (1900 – 1979 рр.) 1947 р. (Нобелівська премія 1971 р.).

Експериментальне втілення й подальше розроблення цього способу (Ю. М. Денисюком 1962 р. та американськими фізиками Е. Лейтом і Ю. Упатнієксом 1963 р.) стали можливими після появи 1960 р. джерел світла високого ступеня когерентності – *лазерів*.

Ідея голографування полягає в тому, що фотографується розподіл інтенсивності в інтерференційній картині, яка виникає через суперпозицію хвильового поля об'єкта та когерентної йому опорної хвилі відомої фази. Подальша дифракція світла на зареєстрованому розподілі почорнінь у фотошарі відновлює хвильове поле об'єкта та передбачає вивчення його за відсутності об'єкта. Крім того, відновлюється й дійсне зображення предмета, що має рельєф, який є зворотним до рельєфу предмета. Тобто опуклі місця замінені увігнутими, і навпаки (якщо спостереження ведуть праворуч від голограми).

Слід зазначити, що голограми Ю. М. Денисюка записують за допомогою когерентного лазерного випромінювання, а зчитувати їх можна

у звичайному білому світлі. Причому колір відновленого зображення предмета буде таким самим, як і колір лазерного випромінювання, використаного під час запису. Це дозволяє записувати кольорові зображення, використовуючи лазери, що випромінюють у червоній, синій і зеленій ділянках спектра. Розглядаючи таку голограму в білому світлі, дістанемо зображення предмета в цих же кольорах. Додавання їх, так само як і в кольоровому телебаченні, передає колірні відтінки предмета.

Запис і читання плоских голограм можливі тільки з використанням когерентного, лазерного випромінювання. Для запису об'ємних голограм необхідно когерентне випромінювання, проте розглядати їх можна й за звичайного освітлення.

Виготовлення голограм (як плоских, так і об'ємних) є технічно складним завданням. Тому голограми є дорогими.

Три типи голограм: плоскі, об'ємні та райдужні – можна об'єднати загальною назвою "*оптичні статичні голограми*". Ці голограми фіксують об'ємне зображення предмета в електромагнітному полі у видимій, зазвичай, ділянці спектра з використанням опорного пучка, під час запису на fotocутливому матеріалі (фотоплівка, фоторезист) з утворенням статичного (не змінного за часом) зображення.

Методи голографії (запис голограми у тривимірних середовищах, кольорове та панорамне голографування тощо) досягають усе більшого розвитку. Застосування голографії є різноманітними, але найбільш важливими, що набувають усе більшого значення, є запис і зберігання інформації. Методи голографії дозволяють записувати в сотні разів більше сторінок друкованого тексту, ніж методи звичайної мікро-фотографії. За підрахунками, на фотоплатівку розміром 32 × 32 мм можна записати 1 024 голограми (площа кожної з них 1 мм²), тобто на одній фотоплатівці можна "розмістити" книжку обсягом понад тисячу сторінок. Як подальші розробки можуть слугувати ЕОМ із топографічною пам'яттю, голографічний електронний мікроскоп, голографічне кіно та телебачення, топографічна інтерферометрія тощо. Поява лазерів, когерентних джерел оптичного випромінювання, дало не тільки зручний і надійний інструмент для запису та відновлення об'ємного зображення предметів, але й розширило можливості самої голографії.

Галузь оптики, предметом якої є ефекти, пов'язані зі зміною характеристик середовища під дією лазерного випромінювання, називають

нелінійною оптикою. Ці явища цікаві тим, що шляхом інтерференції опорної та предметної хвиль інтенсивність світла змінюється у просторі. Відповідно до неї змінюється й показник заломлення, а в середовищі виникає голограма об'єкта, яка існує, доки існують лазерні поля. Таку голографію називають *динамічною*, оскільки вона фіксує в реальному масштабі часу всі зміни в розташуванні та формі предмета в обсязі нелінійно оптичного середовища. Динамічна голографія має переваги перед статичною. На основі динамічних голографічних перетворювачів може бути створено логічні елементи ЕОМ із надзвичайно високою швидкодією (10^{-12} с), системи оперативної пам'яті та інші пристрої оптоелектроніки. Динамічна голограма змінюється, відповідно до зміни у просторі та часі предметної хвилі, та може бути відновленою.

2.4. Поширення світла в речовині

2.4.1. Поляризація світла

Світло є окремим випадком електромагнітної хвилі, яка має поперечний характер і є двома взаємно перпендикулярними синфазними векторами напруженостей електричного та магнітного полів, які коливаються у площинах, перпендикулярних вектору швидкості електромагнітної хвилі. Поперечну хвилю називають *поляризованою*, якщо для неї є певний, виділений напрямок коливань. Площина, що є перпендикулярною до напрямку поширення світлової хвилі, у якій лежать обидва вектори напруженостей електричного \vec{E} та магнітного \vec{H} полів, є *площиною поляризації*. Розрізняють три види поляризації: *лінійну*, або *плоску*; *колову*, або *циркулярну*; та *еліптичну* поляризацію. До них можна умовно додати *випадково хаотичну* поляризацію.

Плоску світлову хвилю називають *лінійно поляризованою*, якщо її вектор напруженості електричного поля \vec{E} (відповідно і вектор \vec{H}) лежить у тій самій площині. Історично склалося так, що **площиною поляризації** названо площину, у якій перебуває вектор напруженості магнітного поля \vec{H} . Площина, у якій перебуває вектор \vec{E} , є **площиною коливань**. Тому надалі, описуючи поляризацію хвилі, будемо стежити тільки за її вектором напруженості електричного поля \vec{E} .

Плоска світлова хвиля є *поляризованою по колу*, якщо з її поширенням кінець її вектора напруженості електричного поля \vec{E} описує спіральну циліндричну лінію. Узагальненням поляризації за колом є *еліптична поляризація*, за якої у процесі поширення хвилі кінець її вектора \vec{E} описує спіральну еліптичну лінію.

Природне світло, що випускається великою кількістю атомів, довільно орієнтованих у просторі, точно кажучи, є неполяризованим. Умовно природне світло можна називати *випадково хаотично поляризованим*. Можна створити *частково поляризоване світло*, у якому не всі площини коливань є однаково поданими, а є деяка виділеність одних коливань перед іншими. Можна ввести величину, яка характеризує ступінь поляризації в частково поляризованому світлі.

Поляризоване та частково поляризоване світло, так само як і поляризоване по еліпсу, можна розкласти на два плоскополяризованих променя. Цією обставиною на практиці широко користуються для створення плоскополяризованого світла. Принцип такого процесу такий: потрібно створити прилад, який би одну зі складових плоскополяризованих хвиль природного світла затримував, а другу – пропускав. Коли справу мають із поляризаційними явищами, то зазвичай доводиться вирішувати два питання: як створити поляризоване світло та як зареєструвати його поляризацію. Прилад для вирішення першого завдання називають *поляризатором*, для вирішення другого – *аналізатором*. Зазвичай, поляризатор та аналізатор є взаємозамінними.

Наведемо приклади поляризаторів. Є кристали, у яких плоскополяризоване світло поглинається суттєво по-різному, залежно від розташування площини коливань. За певного розташування цієї площини поглинання є слабким, а за розташуванням, перпендикулярним до першого, навпаки, поглинання є дуже сильним. У проміжних положеннях площини коливань поглинання світла поступово змінюється від максимуму до мінімуму. Речовини з такими властивостями називають *дихроїчними*. До таких речовин, зокрема, належить *кристал турмаліну*. Платівка з турмаліну навіть товщиною 1 – 2 мм може слугувати поляризатором та аналізатором. Іншим прикладом поляризатора є *поляроїд* – штучно виготовлена плівка, що має також властивість дихроїчності (кристали з герпатиту, які вводять у желатин або целюлозу). Поляроїди дають лише частково поляризоване світло, ступінь поляризації якого є не дуже великим.

Ступінь поляризації того чи того променя суттєво залежить від кута падіння променя. Є *кут падіння* (у кожній парі прозорих середовищ він свій), за якого відбите світло стає повністю плоскополяризованим (ступінь поляризації дорівнює одиниці), а заломлений промінь залишається частково поляризованим. Ступінь його поляризації в цьому куті є максимальним. Цей кут називають *кутом Брюстера* i_0 . Його визначають з умови (*закон Брюстера*): $\text{tgi}_0 = n$.

Пристрій, у якому з різних кінців труби вмонтовано поляризатор та аналізатор, називають *поляриметром*.

Аналізатор пропускає світло повністю (не беручи до уваги поглинання), якщо його площину коливань поєднано із площиною пропускання самого аналізатора.

Якщо повертати аналізатор навколо осі поляриметра, то інтенсивність світла, що проходить, буде змінюватися від нуля (у такому разі говорять, що поляризатор та аналізатор схрещено) до деякого максимального значення. Якщо позначити інтенсивність світла J_p , яке пройшло через поляризатор, то інтенсивність світла, яке пройшло через аналізатор, буде підпорядковано **закону Малюса**: $J_a = J_p \times \cos^2 \alpha$.

Розміщуючи між поляризатором та аналізатором у трубці поляриметра різні середовища (розчини, кристали та ін.), можна спостерігати явища поляризації.

Розглянемо процес заломлення світла в анізотропних середовищах, у кристалах. Цей процес тісно пов'язано з поляризацією світла (і використовують для виготовлення поляризаторів). Зупинимось на так званих *одноосьових кристалах*. У таких кристалах (наприклад, у кристалі ісландського шпату CaCO_3) є виділений напрям – такий, що якщо заломлений промінь іде в цьому напрямку, то спостерігають звичайне заломлення, підпорядковане закону заломлення. Якщо ж заломлення відбувається у всіх інших напрямках, то спостерігають незвичайне, так зване *подвійне променезаломлення*. Напрямок, у якому не спостерігають подвійного променезаломлення, називають *оптичною віссю кристала*. Кристали, у яких такий виділений напрям є єдиним, називають *одноосними*. Кристал ісландського шпату належить до такої категорії. Світло, що падає на кристал, заломлюючись, створює не один заломлений промінь, як в ізотропних середовищах, а два, що йдуть у різних напрямках. У цьому й полягає саме *явище подвійного променезаломлення*. Якщо через такий кристал подивитися на навколишні предмети, то кожен предмет буде роздвоюватися.

Особливістю подвійного променезаломлення є те, що один із заломлених променів підкоряється закону заломлення, а другий промінь цьому закону не підпорядковується. Обидва заломлених променя є плоскополяризованими, і їхні площини коливань взаємно перпендикулярними. Тут промінь о називають *звичайним*, а промінь е – *незвичайним*. Обидва промені виходять із кристала плоскополяризованими у взаємно перпендикулярних площинах.

Подвійне променезаломлення дозволяє побудувати досконалі поляризатори, наприклад *призми Ніколя* (скорочено – *ніколь*), які складаються з двох прямокутних призм з ісландського шпату. Кути призм дорівнюють 68° і 22° . Призми склеєні шаром канадського бальзаму. Оптична вісь лежить у площині креслення під кутом 48° до грані призми. Промінь, що падає, розбивається на звичайний і незвичайний. Перший сильніше заломлюється, ніж другий, і на межі "ісландський шпат – канадський базальт" випробовує повне внутрішнє відбивання, тобто цілком відхиляється вбік. Тільки незвичайний промінь проходить призму. На виході призми буде утворено плоскополяризований промінь.

2.4.1.1. Інтерференція поляризованого світла

Явища інтерференції поляризованих променів досліджували у класичних дослідах О.-Ж. Френеля (1816 р.), які довели поперечність світлових коливань. Сутність їх полягає в залежності результату інтерференції від кута між площинами світлових коливань: смуги є найбільш контрастними в паралельних площинах і зникають, якщо хвилі є поляризованими ортогонально. Труднощі утворення інтерференції поляризованих хвиль полягають у тому, що з накладанням двох когерентних променів, поляризованих у взаємно перпендикулярних напрямках, ніякої інтерференційної картини з максимумами та мінімумами інтенсивності бути не може. Інтерференція виникає тільки в тому разі, якщо коливання у взаємодійних променях відбуваються вздовж одного й того самого напрямку. Коливання у двох променях, що спочатку були поляризованими у взаємно перпендикулярних напрямках, можна звести в одну площину, пропустивши ці промені крізь поляризувальну кристалічну платівку.

2.4.1.2. Штучна анізотропія

Ізотропні прозорі середовища не викликають інтерференцію, але якщо платівку з такого матеріалу (наприклад, із прозорої пластмаси) піддати деформації й напрузі, то вона набуває анізотропних властивостей і виявляє подвійне променезаломлення. Цією обставиною можна скористатися для моделювання картини напружень у різних деталях напружених конструкцій (наприклад, будівельних).

Смуги у кристалічному клині розміщено за рівною товщиною, їх можна назвати *смугами рівної товщини*, а смуги в напруженій ізотропній платівці розміщено за рівною напругою – це будуть *смуги рівної напруженості*. Моделюючи напружену деталь із прозорої пластмаси та висвітлюючи її монохроматичним світлом, між схрещеними ніколями можна якісно оцінити напруження в деталі, а головне – визначити розподіл напружень у ній (наприклад, у навантаженої балці).

Інше застосування інтерференції поляризованих променів пов'язано з електричним полем. Рідини є ізотропними. Якщо їх помістити між схрещеними ніколями, то інтерференцію не спостерігають. Рідина, поміщена в електричне поле, електрично поляризується та стає *анізотропною*. У результаті під впливом електричного поля в рідині (так звана *комірка Керра*) виникає подвійне променезаломлення. Якщо ніколи є схрещеними, то за відсутності поля світло через комірку Керра не проходить. Під дією однорідного електричного поля між платівками конденсатора рідина (використовують зазвичай нітробензол) стає анізотропною. Світло, що проходить через кювету, повертає площину поляризації, і система стає прозорою. Тому комірка Керра може слугувати затвором світла, що управляє потенціалом одного з електродів конденсатора, поміщеного в комірку. На основі комірок Керра побудовано безінерційні затвори та модулятори світла із часом спрацьовування до 10^{-12} с. Величина подвійного променезаломлення є прямо пропорційною квадрату напруженості електричного поля: $\Delta n = nkE^2$ (закон Керра). Тут n – показник заломлення речовини за відсутності поля, $\Delta n = n_e - n_o$, де n_e і n_o – показники заломлення для незвичайної та звичайної хвилі, k – постійна Керра.

2.4.2. Дисперсія світла

Із поширенням світла в речовині виникають такі явища:

1) змінюється швидкість поширення, причому вона залежить від довжини світлової хвилі. Це явище називають **дисперсією**;

2) частина енергії світлової хвилі втрачається. Це явище називають *поглинанням, або абсорбцією*, світла;

3) в оптично неоднорідному середовищі виникає **розсіювання** світла на його просторових неоднорідностях.

Дисперсією світла називають залежність показника заломлення n речовини від частоти ν (довжини хвиль λ) світла або залежність фазової швидкості світлових хвиль v від їхньої частоти.

Фазова швидкість – це швидкість переміщення фази гармонійної хвилі. Фазову швидкість v обчислюють через частоту ν і довжину хвилі (або через колову частоту $\omega = 2\pi\nu$ і хвилеве число $k = 2\pi / \lambda$) формулою $v = \lambda\nu = \omega/k$. Поняття "фазова швидкість" можна застосовувати, якщо гармонічна хвиля поширюється без зміни форми. Ця умова завжди виконується в лінійних середовищах. За умови залежності фазової швидкості від частоти, або, що є тим самим, від довжини хвилі говорять про *дисперсію швидкості*. У відсутності дисперсії хвилі поширюються, не змінюючи форми, зі швидкістю, що дорівнює фазовій швидкості.

За наявності дисперсії негармонічні хвилі змінюють свою форму, і звичайне поняття швидкості щодо таких хвиль стає непридатним. У цих випадках важливим є поняття *групової швидкості* та *швидкості фронту хвилі*.

Дисперсію світла можна подати у вигляді залежності: $n = n(\lambda)$ або $n = n(\nu)$. Цю залежність пов'язано із взаємодією електромагнітного поля світлової хвилі з атомами та молекулами, що призводить до поглинання. Показник заломлення стає комплексною величиною $\tilde{n} = n + i\chi$, де χ характеризує поглинання.

У видимій та ультрафіолетовій ділянках спектра основне значення мають коливання електронів, а в інфрачервоній – коливання іонів.

Наслідком дисперсії є розкладання у спектр пучка білого світла під час проходження його через призму. Кут відхилення променів призмою залежить від показника заломлення n , а n – функція довжини хвилі. Тому промені різних довжин хвиль після проходження призми відхиляються на різні кути.

Пучок білого світла за призмою розкладається у спектр, який називають *дисперсійним*, або за призмивим, що й спостерігав І. Ньютон. За допомогою призми, так само як за допомогою дифракційної ґратки, розкладаючи світло у спектр, можна визначити його спектральний склад.

Величина $D = \frac{dn}{d\nu}$ (або $D = \frac{dn}{d\lambda}$), яку називають **дисперсією речовини**, показує, як швидко змінюється показник заломлення з довжиною хвилі. Ця залежність є нелінійною й немонотонною. Ділянки значення ν , у яких $\frac{dn}{d\nu} > 0$ або $\frac{dn}{d\lambda} < 0$, відповідають **нормальній дисперсії світла** (зі зростанням частоти ν показник заломлення n збільшується).

Нормальну дисперсію спостерігають у речовин, прозорих для світла. Звичайне скло є прозорим для видимого світла, і в цій ділянці частот спостерігають нормальну дисперсію світла у склі. На основі явища нормальної дисперсії засновано "розкладання" світла скляною призмою монохроматорів. Дисперсія є *аномальною*, якщо $\frac{dn}{d\nu} < 0$ або $\frac{dn}{d\lambda} > 0$, тобто зі зростанням частоти ν показник заломлення n зменшується. Аномальну дисперсію спостерігають у ділянках частот, що відповідають смугам інтенсивного поглинання світла в цьому середовищі. У звичайного скла в інфрачервоній та ультрафіолетовій ділянках спектра спостерігають аномальну дисперсію. Залежності n від ν і λ показано на рис. 2.7.

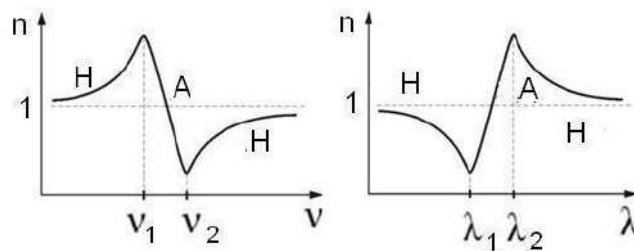


Рис. 2.7. Залежності n від ν і λ

На графіку залежності $n(\lambda)$ є ділянка, де $n < 1$. Це означає, що фазова швидкість світлової хвилі така: $v = (c / n) > 1$. На перший погляд, це твердження суперечить теорії шодості, згідно з якою швидкість світла у вакуумі є максимально можливою швидкістю передавання сигналу. Але

монохроматична хвиля не може передавати сигнал: вона ніколи не закінчується й ніде не починається. Така хвиля складається з нескінченно повторюваних однакових горбів і западин, які нічим не відрізняються один від одного.

Передавати сигнал можна лише обмеженим у просторі та часі відрізком електромагнітної хвилі – *електромагнітним імпульсом*. Такий імпульс (група хвиль) можна подати у вигляді накладання нескінченного числа монохроматичних хвиль із різними частотами й амплітудами (*інтеграл Фур'є*). Можна подавати імпульс (групу хвиль) сукупністю двох близьких за частотою монохроматичних хвиль ($\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega$ і, відповідно, для хвильового числа $\Delta k = k_2 - k_1$). І тоді можна вважати, що імпульс (група хвиль) – *це монохроматична хвиля* $\xi(x,t) = A \cos(\omega t - kx)$ з амплітудою $A = \left| 2a \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}x\right) \right|$, яка повільно змінюється.

Будемо стежити за поширенням у просторі точки x_m , де амплітуда A є максимальною. Назвемо **груповою швидкістю** u швидкість переміщення у просторі точки з координатою x_m $u = \frac{dx_m}{dt}$. Остаточний вираз для групової швидкості $u = \frac{d\omega}{dk}$.

Залежно від характеру дисперсії групова швидкість u в речовині може бути як більшою, так і меншою за фазову швидкість v (у недиспергуючому середовищі $u = v$).

Групову швидкість u можна записати у такому вигляді: $u = \frac{d\omega}{dk} = v / \left(1 + \frac{v}{n} \frac{dn}{dv}\right)$. За нормальної дисперсії $u < v$ і $\frac{dn}{d\lambda} > 0$. За *аномальної дисперсії* $u > v$; зокрема, якщо $n + v \frac{dn}{dv} < 1$, то $u > c$. Цей результат не суперечить спеціальній теорії швидкості.

Поняття групової швидкості правильно описує поширення тільки такого сигналу (хвильового пакета), форма якого не змінюється з переміщенням сигналу в середовищі. У ділянці частот, що відповідають аномальній дисперсії, групова швидкість не збігається зі швидкістю сигналу, оскільки, унаслідок значної дисперсії, форма сигналу так швидко змінюється, що не має сенсу говорити про групову швидкість.

Послідовний опис взаємодії світла з речовиною можливий тільки в межах квантової теорії. Однак здебільшого можна обмежитися описом

у межах хвильової (електромагнітної) теорії випромінювання та класичної електронної теорії. Згідно з нею кожен молекулу середовища можна розглядати як систему зарядів, які мають можливість здійснювати гармонічні коливання, як систему осциляторів із різними власними частотами та коефіцієнтами загасання. Рух цих осциляторів можна розглядати на основі законів Ньютона. Тобто дисперсію світла може бути пояснено на основі електромагнітної та електронної теорій речовини. Із падінням світла на речовину світлові хвилі, що падають, складаються із вторинними хвилями, що виникають, унаслідок коливань електронів і ядер, що входять до складу атомів і молекул речовини та приведених у стан коливального руху змінним полем світлової хвилі, що падає. Водночас прийнято вважати, що заряджені частинки в атомах і молекулах утримуються біля свого стану рівноваги квазіпружними силами. Унаслідок цього електрони, ядра, іони можуть мати власну частоту коливань ω_0 . Світлова хвиля, що падає, поширюючись через речовину, змушує заряджені частинки здійснювати вимушені коливання із частотою ω . Ґрунтуючись на цих уявленнях, можна визначити залежність показника заломлення від довжини світлової хвилі. Класичну теорію, яка розглядає процеси, що відбуваються за умови $E_m \ll E_A$, називають *лінійною оптикою* (де E_m – амплітудне значення напруженості електричного поля хвилі; E_A – амплітуда такої хвилі, енергія якої дорівнює енергії зв'язку частинки у структурі). Закони лінійної оптики є справедливими для $E_m = 10 - 10^3$ В/м. Якщо амплітудне значення $10^9 - 10^{11}$ В/м, то $E_m > E_A$ і відповідний розділ теорії належить до *нелінійної оптики*.

Дисперсія світла є результатом взаємодії електромагнітної хвилі із зарядженими частинками, що входять до складу речовини. Теорія Максвелла не могла пояснити це явище, тому що тоді ніхто не знав про складну будову атома.

Класичну теорію було розроблено Г. А. Лоренцем після створення ним електронної теорії будови речовини. Він показав, що $n^2 = \epsilon$, а ϵ – теж залежить від частоти.

Для видимого світла є тільки поляризація електрично пружного зрушення. Зміщуються переважно валентні електрони. У процесі *вимушених* (під дією світлової хвилі, що падає) коливань електронів із частотою ν (частота примусової сили) періодично змінюються дипольні електричні моменти атомів, частота яких теж дорівнює ν . Середня відстань між атомами речовини є набагато меншою, ніж довжина одного цугу хвиль.

Отже, вторинні хвилі, які випромінюються великою кількістю сусідніх атомів речовини, когерентні як між собою, так і з первинною хвилею. Із додаванням цих хвиль вони інтерферують, у результаті створюються всі спостережувані оптичні явища, пов'язані із взаємодією світла з речовиною.

Фаза вторинної хвилі є іншою (впливає запізнювання зміщення електрона – зсув відбувається тільки з досягненням певної величини електричного поля), але різниця фаз первинної та вторинної хвиль є постійною. Швидкість поширення фронту хвилі (*фазова швидкість*) залежить від результату додавання, тобто від фази результативної хвилі.

В однорідній ізотропній речовині в результаті інтерференції утворюється хвиля, напрямок поширення якої збігається з напрямком первинної хвилі.

В оптично неоднорідному середовищі (із різним n) додавання першої та другої хвиль приводить до розсіювання світла. За умови падіння світла на межу розділу двох середовищ у результаті інтерференції виникає не тільки хвиля, що проходить (заломлюється), але й відбита хвиля. Відбивання відбувається не від геометричної поверхні розділу, а від більш-менш значного шару частинок середовища, що прилягають до межі розділу.

Слід особливо зазначити, що дисперсія світла є невід'ємною властивістю речовини. Для речовин, що складаються з атомів із декількома електронами, можлива наявність декількох смуг аномальної дисперсії, оскільки частота власних коливань електрона ω_0 в атомах залежить від їхнього віддалення від ядра атома. Кількість електронів залежить від величини заряду ядра. Із цього випливає, що кожна речовина обов'язково має не менше ніж дві смуги аномальної дисперсії. Одна смуга відповідає коливанням зовнішніх електронів, а друга – коливанням ядер. Смуги аномальної дисперсії, які відповідні коливанням ядер, лежать у далекій інфрачервоній ділянці спектра, тому що коливання ядер відбуваються з меншою частотою, ніж коливання електронів.

2.4.3. Поглинання (абсорбція) світла

Поглинанням (абсорбцією) світла називають явище втрати енергії світловою хвилею, що проходить через речовину. Із проходженням електромагнітної хвилі через речовину частина енергії хвилі витрачається

на збудження коливань електронів. Частково ця енергія знову повертається випромінюванню у вигляді вторинних хвиль, що збуджуються електронами; частково ж вона переходить в інші види енергії (наприклад, в енергію руху атомів, тобто у внутрішню енергію речовини). Із поглинанням світла коливання загасають, й амплітуда електричної складової зменшується в міру поширення хвилі. Так, інтенсивність світла із проходженням через речовину знижується – світло поглинається в речовині. Вимушені коливання електронів, а отже, і поглинання світла, стають особливо інтенсивними за резонансної частоти. Інтенсивність хвилі буде змінюватися **за законом Бугера**.

П. Бугер (1698 – 1758 рр.) – французький учений, який вивів таку закономірність:

$$J(x) = J_0 \exp(-\alpha x), \quad (2.14)$$

де J_0 – інтенсивність хвилі на вході в середовище;

α – постійна, що залежить від властивостей поглинальної речовини. Це *коефіцієнт поглинання* – фізична величина, що кількісно дорівнює зворотному значенню товщини шару речовини, у якому інтенсивність хвилі зменшується в $e = 2,72$ разів.

Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі визначає *спектр поглинання матеріалу*. У речовині (наприклад, у газі) можуть бути наявні кілька сортів частинок, що беруть участь у коливаннях під дією електромагнітної хвилі, що поширюються. Якщо ці частинки слабо взаємодіють, то коефіцієнт поглинання є малим для широкого спектра частот, і лише у вузьких ділянках він різко зростає. Ці ділянки відповідають частотам власних коливань оптичних електронів в атомах різних видів. Спектр поглинання таких речовин є *лінійчастим* у формі темних смуг на райдужній забарвленості спектра, якщо це видима ділянка. Максимуми відповідають резонансним частотам коливань електронів усередині атомів. Коефіцієнт поглинання, що залежить від довжини хвилі λ (або частоти ω), для різних речовин є різним. Наприклад, одноатомні гази та пари металів (тобто речовини, у яких атоми розташовано на значних відстанях один від одного та їх можна вважати ізольованими) мають близький до нуля коефіцієнт поглинання. І лише для дуже вузьких спектральних ділянок (приблизно 10^{-12} – 10^{-11} м) спостерігають різкі максимуми (так званий *лінійчастий спектр поглинання*). Ці лінії відповідають частотам власних коливань електронів в атомах.

Спектр поглинання молекул, що визначають коливаннями атомів у молекулах, характеризується смугами поглинання (приблизно 10^{-10} – 10^{-7} м). Коефіцієнт поглинання для діелектриків є невеликим (приблизно 10^{-3} – 10^{-5}). Однак у них спостерігають селективне поглинання світла в певних інтервалах довжин хвиль, коли α різко зростає, і порівняно широкі смуги поглинання (приблизно 10^{-7} – 10^{-6} м), тобто діелектрики мають суцільний спектр поглинання. Це пов'язано з тим, що в діелектриках немає вільних електронів і поглинання світла обумовлено явищем резонансу за умови вимушених коливань електронів в атомах та атомів у молекулах діелектрика.

Коефіцієнт поглинання для металів має великі значення (приблизно 10^3 – 10^4 см⁻¹), і тому метали є практично непрозорими для світла. У металах через наявність вільних електронів, що рухаються під дією електричного поля світлової хвилі, виникають швидкозмінні струми, що супроводжуються виділенням джоулевої теплоти. Тому енергія світлової хвилі швидко зменшується, перетворюючись на внутрішню енергію металу. Чим вищою є провідність металу, тим більше в ньому поглинання світла. Залежністю коефіцієнта поглинання від частоти (довжини хвилі) пояснено забарвленість тіл, що поглинають.

Спектральний аналіз дозволяє здобути інформацію про склад Сонця, оскільки певний набір спектральних ліній винятково точно характеризує хімічний елемент. Так, за допомогою спостережень спектра Сонця було відкрито гелій.

Видима частина сонячного випромінювання, яку вивчають за допомогою спектроаналізувальних приладів, виявляється неоднорідною – у спектрі спостерігають *лінії поглинання*, уперше описані 1814 р. І. Фраунгофером.

За допомогою спектрального аналізу дізналися, що зірки складаються з тих самих елементів, які є й на Землі.

Явище поглинання використовують в *абсорбційному спектральному* аналізі суміші газів, заснованому на вимірюваннях спектрів частот та інтенсивностей ліній (смуг) поглинання.

Структуру спектрів поглинання визначаються складом і будовою молекул, тому вивчення спектрів поглинання є одним з основних методів кількісного та якісного дослідження речовин.

2.4.4. Випромінювання Вавилова – Черенкова

П. О. Черенков, вивчаючи дію електромагнітного випромінювання на речовину, з'ясував *особливий вид світіння рідини* під дією γ -променів радію. Подібне випромінювання світла було виявлено й під дією інших заряджених частинок, наприклад електронів. Основні характерні особливості цього випромінювання:

1) *світіння мало блакитний колір* і спостерігалось у всіх чистих прозорих рідин, причому яскравість і колір світіння незначно залежали від хімічного складу рідини;

2) *на відміну від люмінесценції*, не спостерігалось ні температурного, ні домішкового ослаблення світіння;

3) випромінювання має *поляризацію та спрямованість* уздовж напрямку руху частинки.

Випромінювання Вавилова – Черенкова – це випромінювання електрично зарядженої частинки, що рухається в середовищі зі швидкістю $c/n < v < c$, що перевищує швидкість світла в цьому середовищі.

Експерименти П. О. Черенкова, зроблені за ініціативою С. І. Вавилова, виявили ряд не пояснених особливостей випромінювання: світіння спостерігають у всіх прозорих рідин; яскравість мало залежить від їхнього хімічного складу та хімічної природи; випромінювання поляризоване з переважним напрямком електричного вектора вздовж напрямку поширення частинок. Водночас, на відміну від люмінесценції, не спостерігають ні температурного, ні домішкового згасання.

На підставі цих даних С. І. Вавіловим було зроблено основоположний висновок, що виявлене явище – не є люмінесценцією, а світло випромінюють рухомі в рідині швидкі електрони. Згідно з електромагнітною теорією, заряд, що рухається рівномірно, не випромінює електромагнітної хвилі. Однак І. Є. Тамм та І. М. Франк показали, що це справедливо лише для швидкостей частинок, що не перевищують фазову швидкість хвилі в цьому середовищі.

У процесі випромінювання Вавилова – Черенкова енергія та швидкість випромінювальної частинки зменшується, тобто частинка гальмується.

У разі руху частинки зі швидкістю більшою, ніж поширюються хвилі в середовищі ($v = c/n$), відповідні до елементарних хвиль сфери перетинаються і їхня загальна огиначна (хвильова поверхня) є конусом із вершиною в точці, яка збігається з моментним розташуванням рухомої частинки.

У результаті інтерференції елементарні хвилі підсилюють одна одну. Нормалі до твірних конуса визначають хвильові вектори, тобто напрямки поширення світла. Кут φ , який становить хвильовий вектор із напрямком руху частинки, задовольняє співвідношенню: $\cos \varphi = (c/nv)$. У цих напрямках вторинні хвилі будуть посилюватися та формувати випромінювання Вавилова – Черенкова. Світло, що виникає на кожній малій ділянці траєкторії частинки, поширюється вздовж твірних конуса, вісь якого збігається з напрямком руху вільного електрона, а кут на вершині дорівнює 2φ .

У рідинах і твердих тілах умова $v < c/n_0$ починає виконуватися для електронів з енергіями $W > 10^5$ еВ, а для протонів – із $W > 10^8$ еВ.

Ефект Вавилова – Черенкова використовують у лічильниках Черенкова, призначених для реєстрації заряджених мікрочастинок (електронів, протонів, мезонів тощо).

2.4.5. Розсіювання світла

Із класичного погляду процес розсіювання світла полягає в тому, що світло, яке проходить через речовину, збуджує коливання електронів в атомах. Коливні електрони стають джерелами вторинних хвиль, що поширюються в усіх напрямках. Це явище, здавалося б, має за всіх умов приводити до розсіювання світла. Однак вторинні хвилі є когерентними, тому необхідно врахувати їхню взаємну інтерференцію. Виявляється, що в разі однорідного середовища вторинні хвилі повністю гасять одна одну в усіх напрямках, крім напрямку поширення первинної хвилі. Тому перерозподіл світла за напрямками, тобто розсіювання світла, є відсутнім. У напрямку початкового променя вторинні хвилі, інтерферуючи з первинною хвилею, що проходить, утворюють результативну хвилю з фазовою швидкістю, відмінною від швидкості світла c . Цим пояснюють заломлення й дисперсію світла.

Отже, розсіювання світла виникає тільки в неоднорідному середовищі. Світлові хвилі, дифрагуючи на неоднорідностях середовища, створюють дифракційну картину, що характеризується досить рівномірним розподілом інтенсивності в усіх напрямках. Таку дифракцію на дрібних неоднорідностях називають **розсіюванням світла**.

Середовища з явно виявленою оптичною неоднорідністю називають *каламутними середовищами*. До них належать:

- 1) дими, тобто суспензії дрібних частинок у газах;
- 2) тумани – суспензії в газах найдрібніших крапель рідини;
- 3) суспензії або суспензії, утворювані твердими частинками, що плавають у рідині;
- 4) емульсії, тобто суспензії дрібних крапель однієї рідини в іншій, яка не розчинює першу;
- 5) тверді тіла на зразок перламутру, молочних стекол і тощо.

У результаті розсіювання світла в бічних напрямках інтенсивність у напрямку поширення убуває швидше, ніж у разі одного лише поглинання. Характер розсіювання в цьому разі залежить від співвідношення між розміром неоднорідностей r і довжиною хвилі світла λ . Для великих частинок ($r \gg \lambda$, r – розмір частинок) спостерігають геометричне розсіювання. У цьому разі все світло, що падає на поверхню великої частинки, розсіюється в боки.

Якщо розмір розсіювальних частинок $r \ll \lambda$, то вимушені коливання всіх електронів однієї такої частинки, що збуджуються пучком, відбуваються в одній фазі. Таку частинку можна розглядати як один коливний диполь. Інтенсивність випромінювання диполя, що коливається за гармонічним законом, пропорційна четвертому ступеню частоти, тобто: $I \sim \omega^4 \sim 1/\lambda^4$.

Така залежність інтенсивності розсіяного світла від довжини хвилі для розсіювання на частинках має назву **закона Релея**.

Розсіювання світла спостерігають також у чистих середовищах, які не містять будь-яких домішок (наприклад, у чистих газах і рідинах, дійсних розчинах). Його називають **молекулярним розсіюванням світла**. Явище обумовлено, як уперше припустив М. Смолуховський, флуктуаціями густини, що виникають у процесі хаотичного теплового руху молекул середовища.

Додатковими причинами виникнення оптичної неоднорідності в чистих середовищах з анізотропними (полярними) молекулами є флуктуації орієнтації молекул (флуктуації анізотропії), а в дійсних розчинах, крім того, флуктуації концентрації.

А. Ейнштейн, ґрунтуючись на ідеї М. Смолуховського, створив 1910 р. теорію молекулярного розсіювання світла. Як показують розрахунки, розміри ділянок середовища, відповідних більш-менш значним

флуктуаціям, за звичайних умов є значно меншими за довжини хвиль видимого світла. Тому теорія А. Ейнштейна привела до тих самих результатів щодо залежності інтенсивності розсіяного світла від λ , а також характеру поляризації розсіяного світла, що й теорія Дж. Релея.

Молекулярним розсіюванням в атмосфері короткохвильової частини видимого сонячного світла пояснено блакитний колір неба. Саме через це під час сходу та заходу пряме сонячне світло, що пройшло крізь значну товщу атмосфери, мало бути червоно-помаранчевим. Флуктуації густини й інтенсивність розсіювання світла зростають із підвищенням температури. Цим пояснено більш насичений колір неба у ясний літній день, порівняно з таким самим зимовим днем.

2.5. Основи фотографічної розвідки

Фотографічна розвідка має істотні переваги перед іншими способами розвідки, оскільки дозволяє здобувати оптичні зображення об'єктів із високим ступенем детальності.

Дані фоторозвідки дозволяють не тільки виявляти об'єкти, але й розпізнавати їх.

Основними характеристиками фотографічних засобів, які необхідно враховувати під час ведення розвідки й розроблення заходів щодо маскуванню, є такі:

- масштаб фотографічного зображення;
- спектральна чутливість;
- контрастність здобутого зображення;
- роздільна здатність.

Масштаб характеризує ступінь зменшення зображуваних на знімку об'єктів.

Спектральна чутливість фотоматеріалів визначає ділянку спектра, який використовують для розвідки. Здобуваючи фотографічні зображення об'єктів у різних ділянках оптичного спектра, можна виявляти такі відмінності у спектральній відбивній здатності об'єктів і фонів, які візуально не сприймають.

Контраст фотографічного зображення визначають співвідношенням ефективних яскравостей об'єкта, фону, атмосферної димки та коефіцієнта контрастності фотографувальної системи.

Роздільна здатність характеризує здатність фотошару відтворювати дрібні деталі об'єктів фотографування.

Спектрозональне фотографування застосовують спеціально для виявлення замаскованих об'єктів.

Сутність його полягає в одночасному фотографуванні об'єктів у двох різних ділянках спектра на двошарову фотоплівку. Верхній світлочутливий шар плівки сприймає тільки інфрачервоне випромінювання в ділянках 0,7 – 0,8 мкм, нижній чутливий до видимого випромінювання – у ділянках 0,5 – 0,6 мкм.

Під дією випромінювань різних довжин хвиль під час фотографування в кожному фотошарі виникають приховані зображення, інтенсивність яких визначають відбивними властивостями фону й об'єкта в зонах світлочутливості фотошарів.

На спектрозональних знімках легко виявляють будь-які порушення рослинного покриву, дороги, мости, фортифікаційні та інші інженерні споруди; листяні породи лісу відрізняються від хвойних.

Роздільна здатність фотографувальної системи характеризує здатність фотошару відтворювати дрібні деталі об'єктів фотографування. Вона визначає вимоги до прийомів і засобів маскування, під час використання яких ускладнюється або виключається розпізнавання об'єктів.

Роздільну здатність фотознімка обчислюють максимальною кількістю окремо переданих фотошаром паралельних штрихів на білому фоні, що припадають на 1 мм знімка. Для її визначення використовують спеціальний тест-об'єкт, або міру, що складається з декількох груп чорних ліній (штрихів) і білих проміжків між ними. Проміжки між штрихами дорівнюють ширині штрихів. Для кожної групи ширина штрихів є різною.

Важливий спосіб розвідки в сучасних умовах – *повітряне та космічне фотографування*.

Космічну фоторозвідку здійснюють зі штучних супутників Землі, які виводять на колові або еліптичні орбіти висотою 180 – 260 км. На розвідувальних супутниках Землі можна встановлювати фотографувальні системи з фокусною відстанню об'єктива від 1 000 до 3 600 мм, що забезпечує можливість здобування фотознімків у масштабі 1 : 50 000 – 1 : 300 000.

Роздільна здатність фотографувальної системи під час знімання з космосу може становити від 30 до 70 ліній/мм. Це дозволяє розрізнити на фотознімках малоконтрастні об'єкти розміром до 2 – 3 м.

Фотографувальні **системи для повітряної розвідки** може бути встановлено на пілотованих або безпілотних літаках, гелікоптерах та автоматичних дрейфувальних аеростатах. На кожному носії монтують один або кілька аерофотоапаратів, які дозволяють здійснювати одночасне планове й перспективне знімання в різних масштабах.

Під час *фотографування з великих висот* (10 – 20 км) застосовують фотоапарати з фокусною відстанню об'єктива 600 – 2 400 мм, що забезпечує здобування знімків у масштабі 1 : 10 000 – 1 : 20 000. Знімання важливих одиночних об'єктів можна здійснювати і в більшому масштабі – 1 : 4 000 – 1 : 5 000.

Фотографування з малих висот (0,3 – 3 км) здійснюють фотоапаратами з фокусною відстанню об'єктива 75 – 300 мм. Роздільна здатність систем у польоті не перевищує 20 – 40 ліній/мм (для контрастних об'єктів).

Наземне фотографування дозволяє здобувати великомасштабні фотознімки об'єктів і фотопанорами місцевості. Із цією метою у військах іноземних держав є спеціальні фотоапарати з фокусною відстанню об'єктива до 2 500 мм. На фотознімках, зроблених таким апаратом із відстані 10 км, добре дешифрують бойові та спеціальні машини.

Агентура може вести наземне фотографування за допомогою звичайних або спеціальних малоформатних фотоапаратів, забезпечених телеоб'єктивами з фокусною відстанню 300 – 500 мм.

Роздільна здатність знімків під час знімання контрастних об'єктів становить 28 – 35 ліній/мм.

2.6. Оптико-електронна розвідка

2.6.1. Основи оптико-електронної розвідки

Під **оптико-електронною розвідкою** (ОЕР) розуміють процес здобування інформації за допомогою таких засобів:

що містять вхідну оптичну систему з фотоприймачем та електронні схеми оброблення електричного сигналу;

які забезпечують приймання електромагнітних хвиль видимого й інфрачервоного діапазонів, що випромінюються або відбиваються об'єктами та місцевістю.

ОЕР *призначено* для вирішення таких завдань:

виявлення об'єктів;

визначення їхньої форми, розмірів, стану;

розкриття характеру продукції, що випускають, її обсягу та ін.;

знімання територій, із метою картографування місцевості;

розвідка метеообстановки в заданих районах.

Принцип роботи апаратури ОЕР засновано на прийманні власного випромінювання об'єктів і фону або відбитого від них випромінювання Сонця, Місяця, зоряного неба.

Апаратура ОЕР дозволяє відрізнити об'єкт від фону за умови, що яскравість об'єкта перевищує яскравість фону.

Апаратуру ОЕР *розподіляють* на активну та пасивну.

Пасивну апаратуру розвідки засновано на прийманні власного або перевідбитого випромінювання об'єктів розвідки.

Активна апаратура розвідки передбачає підсвічування території свого випромінювача.

Зондувальне випромінювання розсіюється об'єктами, місцевими предметами й місцевістю та частина цього випромінювання надходить на вхід оптичної системи апаратури розвідки з подальшим його перетворенням, обробленням та індикацією на відповідних пристроях.

Апаратуру пасивної ОЕР розподіляють на телевізійну, інфрачервону та розвідку лазерних випромінювань.

Апаратуру активної ОЕР розподіляють на лазерну зі скануванням зондувального світлового променя й інфрачервону (ІЧ) із використанням ІЧ-випромінювача для підсвічування місцевості.

Під **телевізійною розвідкою (ТВР)** розуміють здобування інформації за допомогою апаратури, що здійснює приймання сигналів у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, відбитих об'єктами та предметами навколишнього середовища, із подальшим перетворенням та обробленням прийнятих сигналів, із метою формування зображення об'єктів і місцевості.

Основними характеристиками сучасної апаратури ТВР, які визначають якість здобутого зображення, є такі:

спектральна чутливість передавальних телекамер;

масштаб зображення та його контрастність;

роздільна здатність телевізійної системи;

смуга пропускання радіоканалу.

Стратегічну телевізійну розвідку можна здійснювати тільки з використанням малокадрових систем, що працюють на коротких і середніх хвилях. Такі системи здатні передавати лише нерухомі зображення з інтервалом декілька секунд, забезпечуючи дальність передавання 1 000 км і більше.

Під **інфрачервоною розвідкою** розуміють здобування інформації шляхом приймання й аналізу електромагнітних сигналів ІЧ-діапазону хвиль від об'єктів, що випромінювали або відбитих об'єктами та предметами навколишньої місцевості.

ІЧ-розвідку розподіляють на видову та параметричну.

Видова ІЧ-розвідка забезпечує здобування інформації у вигляді зображень різних об'єктів.

Параметрична ІЧ-розвідка забезпечує здобування інформації, що міститься у просторових і випромінювальних характеристиках об'єктів.

Сучасні засоби ІЧ-розвідки працюють на:

принципі приймання відбитого об'єктами випромінювання спеціальних випромінювачів, Місяця, зоряного неба (прилади нічного бачення);

приймання власного випромінювання об'єктів (тепловізори, теплопеленгатори, радіометри).

Прилади нічного бачення (ПНБ) розподіляють на *активні* й *пасивні* (із підсвічуванням місцевості спеціальним випромінювачем і без підсвічування місцевості).

Тепловізори призначено для здобування візуального зображення поверхні й об'єктів, що мають різну температуру або радіаційну здатність.

Теплопеленгатори дозволяють визначити напрямок на джерело випромінювання та його температурний контраст щодо навколишнього фону.

Радіометри використовують для вимірювання розподілу температур за досліджуваними ділянками поверхні Землі або об'єктів.

Теплову розвідку можна здійснювати в будь-який час доби, але вона є більш ефективною вночі, коли наземні предмети не відбивають сонячного світла.

Основними характеристиками електронно-оптичних приладів нічного бачення є такі:

спектральна чутливість використовуваних електронно-оптичних перетворювачів;

збільшення приладів;

контрастність зображення;
роздільна здатність;
поріг чутливості.

Дуже важливим параметром приймачів інфрачервоного випромінювання є *поріг чутливості*. Цю величину за аналогією з пороговим блиском визначають мінімальним опроміненням, вимірюваних Вт/м², яку може виявити приймач.

Чим меншу потужність інфрачервоного випромінювання може бути зафіксовано приймачем, тим довшою є відстань, на якій можна знайти об'єкт.

2.6.2. Основи лазерної розвідки

Під **лазерною розвідкою** (ЛР) розуміють процес здобування видової інформації шляхом опромінення предметів зондувальними лазерними сигналами з подальшим аналізом відбитого лазерного випромінювання. ЛР вирішує ті самі завдання, що й фоторозвідка. Однак, порівняно з останньою, вона має такі *переваги*:

забезпечує можливість прихованого ведення розвідки в нічних умовах;
забезпечує оперативне оброблення та передавання розвідувальної інформації на пункт збирання й оброблення даних.

Лазерні прилади *використовують* у системах далекометрування, локації, підсвічування й цілевказівки, наведення засобів ураження, зв'язку, навігації, розвідки та силового впливу.

Важливим напрямом використання лазерних випромінювачів є **оптична локація**. Малий кут розбіжності променя лазера та високе значення імпульсної потужності вихідного випромінювання забезпечують ряд *переваг* оптичних локаторів, порівняно з *радіолокаторами*:

велику дальність дії за однакової потужності;
більш високу роздільну здатність, що дозволяє відтворювати контури цілі;

більш високу точність визначення координат;
кращу перешкодостійкість.

Нині значного поширення набули такі *системи лазерної локації*:

оглядові оптичні локатори;
локатори для аналізу та вимірювання забруднювальних хімічних домішок в атмосфері (лідари);
оптичні локатори виявлення та супроводу цілей.

Використання лазерів у високоінформативних оптичних системах зв'язку через атмосферу на короткі відстані дозволяє розвантажити діючі канали радіозв'язку, які працюють із великою напруженістю.

Значні перспективи має використання лазерів у *космічних лініях зв'язку на великі відстані, волоконно-оптичних системах зв'язку, а також лазерних приладів у системах навігації.*

Нині широко застосовують *лазерні доплерівські вимірники швидкості та лазерні гіроскопи.*

Використання лазерних випромінювачів для *підсвічування місцевості* суттєво збільшує дальність дії та *перешкодозахищеність* приладів нічного бачення.

До *демаскувальних ознак (ДО)* апаратури з використанням лазерних випромінювачів можна зарахувати такі:

- когерентне світлове випромінювання;
- некогерентне світлове випромінювання джерел накачування;
- побічне випромінювання на частотах радіодіапазону, обумовлене роботою джерел накачування та всіляких модуляторів і синхронізаторів;
- рентгенівське випромінювання, властиве деяким типам лазерів;
- забруднення навколишнього середовища побічними продуктами функціонування деяких лазерних систем;
- акустичні та сейсмічні ефекти;
- зовнішній вигляд пристроїв полігонного обладнання.

Перелічений набір ДО узагальнено за всіма видами апаратури з використанням лазерних випромінювачів. Це означає, що конкретна лазерна система може не мати всіх ознак.

Виявлення джерел лазерного випромінювання. Широке використання лазерних приладів у військовій техніці визначило необхідність у створенні відповідних засобів розвідки джерел лазерного випромінювання та протидії їхній роботі.

Незважаючи на велику різноманітність напрямів застосування лазерних пристроїв у військовій справі, вибір довжин хвиль лазерного випромінювання для практичних систем обмежено, що полегшує вирішення завдання з розроблення засобів розвідки лазерних випромінювань.

Так, у *системах далекометрування* застосовують лазери, що працюють на фіксованих довжинах хвиль: 0,69; 0,84; 1,06; 1,54 і 2,1 мкм;

у *системах цілевказівки та підсвічування*, зазвичай, використовують лазери, що працюють на довжинах хвиль 0,84 і 1,06 мкм;

у *системах повітряної розвідки*: 0,45; 0,51 мкм;

у системах зв'язку: 0,84; 0,9; 1,06; 3,39 і 10,6 мкм;

у системах навігації: 10,6 мкм.

Тому під час створення засобів розвідки необхідно орієнтуватися на зазначені раніше значення довжин хвиль.

Для виявлення лазерного випромінювання систем далекометрування, локації, зв'язку, підсвічування, розвідки, наведення засобів ураження, що працюють на довжинах хвиль до 1,1 мкм, можна використовувати ПНБ із киснево-цезієвими фотокатодами, діапазон спектральної чутливості яких лежить у межах 0,4 – 1,2 мкм.

2.7. Основні засоби відеоспостереження та знімання

2.7.1. Портативні засоби відеоспостереження та знімання

Сучасні засоби відеоспостереження дозволяють із відстані до декількох кілометрів спостерігати дії осіб, а з відстані кількох сотень метрів розпізнавати номери машин і навіть, наприклад, читати зміст плакатів, вивішених у кабінеті на стіні протилежного вікна.

Під час віддалення об'єкта розвідки в межах кількох сотень метрів для спостереження використовують *біноклі, монокуляри та підзорні труби* із кратністю збільшення 8 – 16 разів. Для стабілізації зображення вони, зазвичай, кріпляться на спеціальні штативи.

Також використовують і *прилади з електронною стабілізацією зображення*, які дозволяють вести спостереження з рук навіть з автомобілів і гелікоптерів. До таких засобів належить, наприклад, бінокль зі стабілізацією зображення БС 16 × 40. Він має 16-кратне збільшення, габаритні розміри 240 × 195 × 100 мм і вагу 2,2 кг. Живлення можна підключати до окремого джерела живлення напругою 9 В або бортової мережі напругою 12 – 27 В.

Для *прихованого спостереження* випускають мініатюрні оптичні прилади. Наприклад, мінімонокуляр за 8-кратного збільшення й поля зору 5° має розміри 92 × 35 мм і важить 100 г. Його можна розмістити на долоні, що забезпечує високу потайність використання.

Для *спостереження на значній відстані* (від кількох сотень метрів до кількох кілометрів) використовують спеціальні телескопи. Наприклад, телескоп приладу РК 6500, виготовлений за схемою Шмідта, дозволяє розпізнавати автомобіль на відстані до 10 км. Телескоп має розміри

460 × 560 × 1 120 мм, вагу 54 кг і його встановлюють на спеціальному штативі з електродвигуном. Оптичні прилади можуть з'єднувати з фотоапаратом або відеокамерою.

Для *ведення розвідки вночі* використовують телевізійні камери, що працюють за низького рівня освітлення, та прилади нічного бачення.

Вони мають:

високе посилення (20 000 – 50 000);

стійкість до засвічення від яскравих джерел світла, що потрапляють у поле зору, наприклад фар автомобілів;

рівномірну за полем роздільну здатність і малі габарити.

Фізичний принцип їхньої дії засновано на прийманні відбитого місцевими предметами оптичного випромінювання Місяця, зірок, хмар та інших слабких джерел світла, багаторазового його посилення й перетворення на видиме зображення, що спостерігають людським оком.

Для *збільшення дальності спостереження* в умовах абсолютної темряви використовують спеціальне штучне підсвічування об'єктів. Водночас використовують переважно *інфрачервоні прожектори*, які працюють у близькому інфрачервоному діапазоні хвиль, що виключає виявлення неозброєним оком факту підсвічування.

Перевага ІЧ-освітлювачів полягає в тому, що вони можуть працювати в імпульсному режимі. Ціль водночас висвічується короткими імпульсами лазерного випромінювання. Прилад умикається тільки тоді, коли його об'єктива досягають імпульси, що відбиваються від цілі, унаслідок цього паразитні імпульси, що відбиваються від місцевих предметів, розміщених попереду й позаду цілі, а також відбиті від зважених в атмосфері частинок пилу, вологи, диму, не потрапляють у ПНБ.

Однак такі прилади мають такий *недолік*: малі розміри кута поля опромінення, що утруднює пошук цілі. Тому їх використовують, головним чином, для стеження за виявленою ціллю. Типовим приладом нічного бачення є прилад РК 6540, що випускає фірма РК-Electronic. До його комплексу входять: інфрачервоний прожектор, акумулятор та оптико-електронний перетворювач, за зовнішнім виглядом мало відрізняється від побутової відеокамери.

Зображення на виході ОЕП можна спостерігати *візуально* або *документувати за допомогою фотоапарата*, прикріпленого до окуляра перетворювача.

Інфрачервоний прожектор має параболічний рефлектор, у фокусі якого розміщується точкова лампа підсвічування потужністю 45 Вт.

Комплект розміщується в дипломаті з розмірами 250 × 280 × 100 мм. Вага системи становить 1,4 кг.

Дальність спостереження портативними приладами нічного бачення під час використання для підсвічування додаткових інфрачервоних прожекторів може становити більше ніж 500 м.

Разом із ПНБ для ведення спостереження вночі все частіше використовують **тепловізійні прилади** (тепловізори, ТПВ), які працюють у далекому діапазоні інфрачервоних довжин хвиль.

Тепловізори, порівняно з ПНБ, мають такі *переваги*:

незалежність роботи від рівня природного освітлення;

потайність і більшу дальність дії;

здатність виявляти замасковані об'єкти;

незначне зниження дальності спостереження під час задимлення та запилення атмосфери;

безвідмовність роботи в разі сліпучих засвічень;

здатність виявляти сліди автомашин та іншої техніки;

можливість передавання зображень каналами зв'язку.

Недоліком тепловізорів є необхідність в охолодженні приймачів випромінювання до температури порядку 77 К, що, зазвичай, призводить до значного збільшення їхньої ваги та габаритів.

Однак останніми роками з'явилися тепловізори, що забезпечують якісні характеристики без додаткової системи охолодження, тобто такі, що працюють за кімнатної температури.

2.7.2. Засоби відеоспостереження із близької відстані

Останнім часом для відеоспостереження з близької відстані значного поширення набули **відеокамери**, що забезпечують можливість документування спостережень у динаміці з фіксацією на зображенні часу та дати спостереження.

Відеокамера складається з декількох функціональних вузлів, які визначають її характеристики й, отже, можливість застосування в тих чи тих умовах.

Об'єктив є невід'ємною складовою частиною камери та формує всі геометричні розміри зображення.

Є самостійний клас об'єктивів, що застосовують для прихованого знімання, так звані *пінхоул-об'єктиви*.

Пінхоули бувають двох типів: "вушко голки" та "винесена зіниця".

Об'єктив і приймач випромінювання, зазвичай, конструктивно об'єднують в один пристрій, але іноді для цілей спостереження потрібно їхнє рознесення.

У цьому разі їх з'єднують волоконно-оптичним кабелем, прикладом такого пристрою слугує *ендоскоп*, який використовують для спостереження в закритих об'ємах і закритих приміщеннях.

Найбільш широко застосовують у системах прихованого спостереження *телекамери із приймачами оптичного випромінювання на основі приладів із зарядним зв'язком*.

Ці камери мають такі переваги:

економічність під час споживання електроенергії;

малі габарити та вагу;

здатність працювати не тільки у видимому, а й близькому інфрачервоному діапазонах хвиль;

здатність здобувати кольорові зображення з гарною роздільною здатністю за низького рівня освітленості.

Наприклад, чорно-біла відеокамера з об'єктивом WAT-906 має розміри 50 × 50 × 32 мм і вагу 70 г.

Камера WAT-660 є меншою за сірникову коробку, має об'єктив пінхоул із діаметром вхідної зіниці від 0,9 до 2 мм і її можна легко встановлювати в одвірочку або за шпалери. Причому помітити такий отвір є практично неможливим.

Високочутлива камера WAT-902A має об'єктив з автоматичною діафрагмою, що дозволяє змінювати кратність збільшення від 6 до 20 разів, і здатна працювати навіть у світлі зірок.

Кольорова камера VPC-715 має розміри 42 × 84 × 30 мм, вагу 30 г.

Відеозображення з камер або безпосередньо записують, або передають радіоканалом із використанням спеціальних відеопередавачів.

Якщо потрібно передати *не тільки зображення, а й звук*, то разом із камерою встановлюють мікрофон, з'єднаний із відеопередавачем.

Відеопередавачі працюють у діапазоні від 60 МГц до 2,3 ГГц і навіть вищому. Їхня потужність може становити від 40 мВт до 50 Вт, водночас забезпечено дальність передавання від декількох десятків метрів до 20 км. Наприклад, мініатюрний передавач РК 5115 за потужності 1,5 Вт

на частоті 236 МГц забезпечує передавання відеосигналу на відстань до 400 м.

Якщо потрібно збільшити дальність передавання, використовують *спеціальні ретранслятори*.

Наприклад, відеоретранслятор РК 5120 за потужності 15 Вт забезпечує передавання телевізійного сигналу на відстані до 10 км.

Відеопередавачі та відеоретранслятори можуть оснащуватися системами дистанційного управління радіоканалом.

Для *приймання телевізійних сигналів* використовують спеціальні телевізійні приймачі. Відеоприймачі мають убудовані мікропроцесори, що дозволяють автоматизувати ряд операцій із пошуку та приймання сигналів. Наприклад, відеоприймач РК 6625 має 100 програмованих каналів пам'яті, 24-годинний таймер та автоматичний режим пошуку відеосигналів.

Портативний спеціальний відеомагнітофон SONY GV-S50 (розміри 72 × 39 × 141 мм, вага 330 г) із кольоровим рідкокристалічним дисплеєм дозволяє одночасно спостерігати відеосигнал, що приймають, і здійснювати його запис.

Із метою потайності спостереження, відеокамери разом із передавачем можуть маскувати під предмети повсякденного вжитку, наприклад, книгу, папку-швидкозшивач тощо.

Часто використовують відеокамери, убудовані в раму картини, настінні годинники.

Мініатюрні камери можна таємно встановити практично в будь-якому місці, наприклад, у бамбуковому стрижні, увіткнутому у квітковий горщик і використовуваному для підв'язування кімнатної рослини (відеомагнітофон або відеопередавачі встановлюють безпосередньо у квітковому горщику) або машинній антені (об'єktiv камери діаметром 5 мм, установлений збоку антени, забезпечує огляд 70°), яка нічим не відрізняється від звичайної, її навіть можна обертати.

Відеокамери та мікрофони також можуть бути прихованими в одязі або особистих речах. Найбільш часто їх встановлюють у дипломатах або сумках, де розміщують відеомагнітофони та передавачі.

Широко використовують міні-відеокамери, які маскують під різні деталі одягу, наприклад, краватку або прищіпку краватки, поясну пряжку або окуляри. Водночас відеопередавачі, зазвичай, кріплять на поясі.

Такими системами можна управляти дистанційно. Наприклад, систему 2102 вмикають із мініпередавача-брелока з відстані 50 м.

Живлення відеокамер і передавачів можна здійснювати або від убудованих акумуляторів, водночас час роботи, зазвичай, не перевищує декілька годин, або від електромережі 220 В, тоді час їхньої роботи практично не обмежено.

Типовий комплект системи відеоспостереження містить:

моноблок SONY-GV-S-50 (малогабаритний відеомагнітофон);

TV-приймач з екраном із діагоналлю 10 см;

тюнер-конвертор в одному корпусі із блоком живлення, що містить акумулятор, адаптер для живлення від мережі 220 В, шнур для підключення до бортової мережі автомобіля 12 В;

зарядний пристрій до акумулятора;

виносну антену;

виносні міні-відеокамеру та мікрофон;

блок передавача з антеною;

з'єднувальні шнури.

Тактика застосування залежить від можливості доступу в контрольоване приміщення.

Найбільш сприятливим періодом для встановлення прихованих систем відеоспостереження є будівництво або реконструкція об'єкта. У цей період на об'єкті працює велика кількість фахівців і, якщо їхню діяльність не контролюють, можливе встановлення систем відеоспостереження практично в будь-якому місці приміщення. Системи можуть бути дуже добре замаскованими та підключеними до електромережі 220 В, що забезпечує практично необмежений час їхньої роботи. Зазвичай, такі системи обладнують пристроями дистанційного управління. З огляду на порівняно великі розміри систем прихованого відеоспостереження (порівняно з акустичними закладками), їхнє встановлення у предмети інтер'єру здійснюють заздалегідь, тобто до встановлення в контрольоване приміщення.

Системи відеоспостереження може бути встановлено в апаратуру в період її ремонту або гарантійного обслуговування. Такі системи, зазвичай, мають акумуляторні джерела живлення, що потребують їхньої періодичної заміни, а для цього потрібен періодичний доступ у приміщення. Якщо доступ у приміщення контролюють, але є можливість його відвідання технічним персоналом (електриками, прибиральницями тощо),

не виключено встановлення відеосистем, закамуюфльованих під предмети, розміщені у приміщенні. Такі системи мають нетривалий час роботи та їх встановлюють, зазвичай, для відеозапису окремих заходів (наприклад, наради).

Система відеоспостереження може бути замаскованою в одязі в одного із присутніх на закритій нараді. Якщо доступ у приміщення контролюють, але можливий доступ у сусіднє приміщення, для відеоспостереження можуть використовувати ендоскопи з діаметром зонда близько 2 – 6 мм і довжиною світловоду більше ніж 2 м. Є можливість дистанційного управління поворотом об'єктива.

Відеоспостереження здійснюють через різні отвори й отвори огорожувальних приміщення конструкцій (відкриті вікна, квартирки, підвісні стелі, замкові щілини, вентиляційні шахти тощо), а також через спеціально просвердлені із цією метою отвори у стінах. Набагато легше організувати відеоспостереження на відкритій місцевості. Систему прихованого відеоспостереження може бути замасковано у кронах дерев, лавках, урнах тощо. Після невдалої спроби здійснити приховану систему відеоспостереження на необхідній відстані, використовують системи далекого спостереження.

2.7.3. Засоби фоторозвідки та фотодокументування

Незважаючи на значні досягнення в галузі створення відеосистем прихованого спостереження, нині для ведення розвідки широко використовують і фотографічні засоби. Особливо часто їх застосовують, коли немає необхідності вести постійне спостереження, а потрібно дістати кілька знімків об'єкта або зняти фотокопію з документа. Із цією метою випускають *мініатюрні фотоапарати* у звичайному виконанні та закамуюфльовані під предмети повсякденного користування.

Характерним представником мініатюрних фотоапаратів є однооб'єктивний дзеркальний фотоапарат РК 785-S. Він має розміри 120 × 50 × 38 мм, вагу 180 г і вільно вміщується в кишені піджака. Це повністю автоматизована камера. Розмір негативу 13 × 18 мм.

Дещо менші розміри має фотоапарат РК 365 (розміри 28 × 52 × 68 мм, а вага 165 г). А ще менші мініфотоапарат РК 415 (розміри 30 × 18 × 80 мм, вага 50 г). Ця камера має автоматичний експонетр, спалах і дозволяє знімання на близькій відстані (перезнімання документів), так і на далекій. Касету розраховано на 12, 24 або 36 кадрів.

Важливою розробкою мініатюрних фотоапаратів є фотокамера РК 420, убудована у звичайні функціонувальні наручні годинники (діаметр 34 мм, товщина 10 мм, вага 70 г). Маскування камери виконано так ретельно, що її виявлення становить труднощі навіть для експертів. Оптична система – прецизійний об'єктив діаметром 2,8 мм і фокусною відстанню 7,5 мм.

Як негатив використовують круглу фотоплівку, що закладають у таку саму круглу касету (діаметр 30 мм, товщина 0,8 мм). Плівку вручну переводять по кадрах за допомогою вбудованого намотувального пристрою, водночас одночасно зводять затвор. Камера зазвичай дозволяє зробити до 7 знімків.

Фотокамера РК 1570-55, убудована в діючу запальничку, дозволяє практично безшумне знімання до 36 кадрів. Розмір негативу 8 × 11 мм забезпечує діставання фотографій відмінної якості.

Управління деякими фотоапаратами можна здійснювати дистанційно. Якщо потрібно зробити фотознімки внутрішніх порожнин різних предметів, недоступних для безпосереднього спостереження, використовують спеціальні ендоскопи.

Засоби фоторозвідки широко використовують для зняття фотокопій документів. Із цією метою використовують не тільки мініфотоапарати, а й спеціальні пристрої, наприклад, РК 320 або D-45.

Копіювальний пристрій РК 320 складається з фотокамери, відкидної стійки, джерел освітлення (дві лампи по 10 Вт) і живлення (8 × 1,5 В або мережу 220 В) і тримачів для оригіналу.

Висоту камери регулюють, що дозволяє фотографувати документи формату А4 – А6. Пристрій розміщують у звичайному дипломаті, і він важить 3,5 кг.

Портативну систему D-45 призначено для швидкого перезнімання документів, оснащено камерою із ширококутним об'єктивом, джерелами освітлення (двома флуоресцентними трубками з відбивачами) і живлення (2 батарейки). Вона дозволяє перезняти до 800 документів форматом А4, А5.

Контрольні запитання

1. Що розуміють під оптичною розвідкою?
2. Які завдання дозволяє вирішувати оптична розвідка?

3. Що є основними характеристиками зору, які суттєво впливають на можливості візуального виявлення замаскованих об'єктів?
4. Що називають щодою видністю?
5. Як характеризують роздільну здатність зору?
6. Які властивості ока характеризує світлова чутливість?
7. Від яких чинників удень залежить видимість об'єкта?
8. Із якою метою використовують світлофільтри?
9. Як обчислюють роздільну здатність фотознімка?
10. Що визначає спектральна чутливість фотоматеріалів?
11. Як визначають контраст фотографічного зображення?
12. У чому полягає принцип роботи апаратури оптико-електронної розвідки?
13. Із якою метою використовують засоби фоторозвідки?
14. Яким є найбільш сприятливим періодом для встановлення прихованих систем відеоспостереження?
15. Що містить типовий комплект системи відеоспостереження?
16. Із яких функціональних вузлів, що визначають її характеристики й, отже, можливість застосування в тих чи тих умовах, складається відеокамера?
17. Яку інформацію дозволяє здобувати наземне фотографування?
18. Для виконання яких розвідувальних завдань призначено портативну систему D-45?

3. Фізичні основи захисту від радіоелектронної розвідки

Мета: розглянути основні поняття, особливості основних і неосновних випромінювань, первинних і вторинних електромагнітних випромінювань (ЕМВ); основні поняття радіоелектронної розвідки, радіо- і радіотехнічної розвідки; фізичні основи захисту від радіоелектронної розвідки.

Основні питання

3.1. Основні поняття.

3.2. Радіо- і радіотехнічна розвідка.

Ключові слова: радіоелектронна розвідка; розвідувальна апаратура; електромагнітні випромінювання; радіоелектронні засоби; діаграма

спрямованості випромінювання; тривалість і період проходження випромінюваних імпульсів; частота, вид амплітудного та фазового спектрів; ширина спектра.

Професійні компетентності:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

здатність розуміти основні напрями, цілі, фундаментальні принципи радіоелектронної розвідки, радіо- і радіотехнічної розвідки; фізичні основи захисту від радіоелектронної розвідки з погляду захисту інформації.

Рекомендована література [1; 9; 12; 17].

3.1. Основні поняття

Радіоелектронна розвідка (РЕР) – це процес здобування інформації в результаті приймання й аналізу електромагнітних випромінювань (ЕМВ) радіодіапазону, створюваних радіоелектронними засобами (РЕЗ), що працюють.

ЕМВ, створювані об'єктами розвідки, можуть бути **первинними** (власними) або **вторинними** (відбитими).

Випромінювання РЕЗ – це найперше їхні основні (власні) випромінювання, що забезпечують функціонування РЕЗ.

Особливість основних випромінювань – детермінований характер їхньої просторової, часової та спектральної структури (діаграма спрямованості випромінювання, тривалість і період проходження випромінюваних імпульсів, частота, вид амплітудного та фазового спектрів, ширина спектра тощо).

Разом з основними під час роботи передавачів РЕЗ наявні й *неосновні випромінювання*, які перебувають поза смугою частот, необхідної для передавання інформації або створення перешкод, і містять певну інформацію про випромінювальні об'єкти.

Вторинні ЕМВ – це випромінювання, що виникають у результаті відбивання (або розсіювання) електромагнітних хвиль (ЕМХ), що опромінюють об'єкт. Падаючи на об'єкт, ЕМХ розсіюються ним у всіх напрямках, зокрема й на джерело зондувального випромінювання.

Для вторинного випромінювання *реальних об'єктів* (літака, корабля, танка) є характерною залежність його параметрів (інтенсивності, спектра,

поляризації, нахилу фазового фронту) від відбивної здатності, геометричної форми та розмірів об'єкта; поляризації хвилі, що падає; взаємної орієнтації джерела випромінювання й об'єкта та параметрів їхнього щодого руху.

Наявність первинних і вторинних ЕМВ об'єктів дозволяє здійснювати розвідку об'єктів і їх розпізнавати.

Радіоелектронна розвідка дозволяє вирішувати такі *завдання*:

виявляти об'єкти, визначати їхнє місце розташування та параметри руху;

визначати параметри об'єктів і характер їхньої зміни в часі;

визначати призначення об'єктів та їхні типи;

перехоплювати передану каналами зв'язку інформацію.

Засоби РЕР працюють у **пасивному** або **активному режимі** (без ЕМВ або з ним) у широкому діапазоні спектра радіочастот.

РЕР має ряд *відмінностей*:

охоплює великі райони, межі яких залежать від особливостей поширення ЕМВ різних ділянок спектра;

функціонує безперервно в будь-яку пору року та за будь-яких метеоумов;

діє без безпосереднього контакту з об'єктами розвідки, що визначає її недосяжність для засобів ураження противника;

забезпечує здобування достовірної інформації, оскільки вона виходить безпосередньо від противника (окрім випадків дезінформації);

дозволяє здобувати великий обсяг найрізноманітнішої інформації про об'єкти противника;

забезпечує здобування інформації в найкоротші строки й найчастіше в реальному масштабі часу, оскільки час доставляння визначено швидкістю поширення радіохвиль.

Залежно від *типу носія*, РЕР розподіляють на космічну, повітряну, морську та наземну.

За застосовуваними принципами й об'єктами, її розподіляють на:

радіорозвідку (РР);

радіотехнічну розвідку (РТР);

радіолокаційну розвідку (РЛР) – видову та параметричну;

радіотеплову розвідку;

розвідку побічних електромагнітних випромінювань і наведень (ПЕМВН).

3.2. Радіо- і радіотехнічна розвідка

3.2.1. Загальні питання

РР і РТР – це пасивні різновиди РЕР, що використовують апаратуру сімейного типу.

РР *призначено* для здобування даних про противника шляхом пошуку, перехоплення, пеленгування та аналізу випромінювань його РЕЗ зв'язку, радіотелеметрії, радіонавігації та здійснюють її за допомогою спеціальних розвідувальних станцій, радіопеленгаторів і комплексів.

У результаті розвідки визначають зміст інформації, що передають, розташування та ТТХ радіостанцій, інтенсивність їхньої роботи за певний період часу, систему мереж зв'язку, щільність розміщення в певних районах.

Аналіз даних РР *дозволяє*:

здобувати інформацію про морально-політичний та економічний стан країни;

здобувати інформацію про взаємозв'язки промислових і наукових організацій;

розкривати структуру мереж зв'язку, дислокацію вузлів зв'язку;

визначати місце розташування військових і військово-промислових об'єктів (В і ВПО), їхню належність, профіль і характер діяльності;

виявляти системи управління та зв'язку;

розкривати відпрацювання нових систем зв'язку, визначати види сигналів і характеристики систем;

визначати параметри нових зразків ракетної техніки за даними перехоплення телеметричної інформації, переданої з борта ракети (під час випробувальних пусків);

розкривати угруповання та боєготовність військ і сил флоту.

РТР *забезпечує* здобування відомостей про ворога шляхом виявлення й аналізу сигналів, що випромінюються РЕЗ локації, навігації, управління та РЕБ, а також радіовипромінювань технічних пристроїв і технологічного обладнання, електрогенераторів та електродвигунів, трансформаторів, реле комутувальних пристроїв, систем запалювання двигунів внутрішнього згоряння тощо.

Засоби РТР *використовують* для вирішення таких завдань:

визначення призначення, типу й місця розташування РЕЗ за даними вимірювання параметрів прийнятих сигналів;

розкриття дислокації та призначення військових і військово-промислових об'єктів (В і ВПО);

визначення складу угруповань і діяльності збройних сил;
розкриття систем радіотехнічного забезпечення ПСО, ПРО та ПКО;
визначення стану й перспектив розвитку радіоелектронного озброєння.

3.2.2. Узагальнена структурна схема радіо- і радіотехнічної розвідки

Під час ведення РР і РТР підлягають вимірюванню:
координати розвідуваних РЕЗ (дальність, азимут, кут місця);
параметри сигналів: носійна частота сигналу, тривалість імпульсу, частота проходження імпульсів, поляризація сигналу, швидкість обертання антени, вид діаграми спрямованості антени, спектральний склад сигналу тощо.

Основними показниками засобів РР і РТР є:

імовірність розвідки, тобто ймовірність того, що сигнал розвідуваних засобів буде прийнятим та обробленим;

максимальна дальність розвідки, що становить найбільшу відстань між РЕЗ і станцією розвідки, за якої сигнали РЕЗ виявляють на фоні власних шумів розвідприймача із заданими ймовірностями правильного виявлення та помилкової тривоги;

сектора розвідки в горизонтальній і вертикальній площинах;

частотний діапазон ведення розвідки (коефіцієнт перекриття);

точність вимірювання, що характеризується зазвичай середньоквадратичним значенням помилки вимірювання параметра;

роздільна здатність за вимірюваним параметром, що визначає можливість роздільного спостереження двох одночасно наявних сигналів, які відрізняються значеннями будь-якого параметра (роздільну здатність оцінюють мінімальною розбіжністю параметрів двох сигналів, за якого ці сигнали ще спостерігають роздільно).

Для ведення РР і РТР застосовують однакову апаратуру розвідки.

Структурна типова схема станції РР і РТР складається з:

антенної системи;

пеленгаційного пристрою;

приймача;

пристрою панорамного огляду;

блоку аналізу та вимірювання параметрів сигналу;

канально-демодулювального пристрою;

блоку управління, запам'ятовування та оброблення із пристроєм документування вихідної інформації;

блоку передавання розвіданих і приймання керувальних команд;

блоку живлення й контролю за працездатністю.

Антенна система здійснює приймання та просторову селекцію сигналів, випромінюваних об'єктами розвідки. Вона має бути широкосмугового, володіти високою просторовою селекцією й забезпечувати пеленгацію джерел ЕМВ із необхідною точністю. Крім того, діаграма спрямованості антени (ДСА) мусить мати мінімальний рівень бічних пелюсток.

Як **індикатор пристрою** панорамного огляду використовують ЕПТ із частотною розгорткою.

Аналізатор параметрів сигналу слугує для їхнього вимірювання та оцінювання, із метою подальшого розпізнавання образу розвідуваних РЕЗ. Із його допомогою можна вимірювати часові, спектральні й енергетичні параметри сигналів, а також визначатися їхню поляризацію.

До *часових параметрів* зараховують тривалості сигналів і часові інтервали між ними, вид модульованої функції; до *спектральних* – високочастотний спектр сигналу і спектр його обвідної.

Енергетичною характеристикою сигналу слугує функція його спектральної густини або розподіл спектральних складових сигналу за потужністю.

Прийняті сигнали та їхні характеристики реєструють за допомогою приладів різного типу (магнітофонів, фотоприставок, електромеханічних, електротермічних, електрохімічних реєстраторів).

3.2.3. Способи визначення місця розташування джерел електромагнітного випромінювання

3.2.3.1. Геометричні величини, що визначають місце розташування (МР) джерел ЕМВ

МР джерел ЕМВ на площині визначають за допомогою ліній положення, а у просторі – поверхонь положення.

Лінією (поверхнею) положення називають геометричне місце точок, для якого геометрична величина, яка визначає можливий стан об'єкта (джерела ЕМВ), має постійне значення.

Місце розташування джерела ЕМІ на площині визначають із перетинання нанесених на карту мінімум двох ліній положення.

Поверхнями положення можуть бути площини, сфери, гіперболоїди обертання. Місце розташування джерела ЕМІ у просторі визначають із перетинання поверхонь положення. Для цього необхідно скористатися як мінімум трьома поверхнями положення.

В основу визначення геометричних величин джерел ЕМВ радіотехнічними методами покладено те, що електромагнітні хвилі у вільному просторі поширюються прямолінійно та з кінцевою постійною швидкістю.

Залежно від використовуваної закономірності поширення ЕМВ, вимірювачі геометричних величин (поверхонь положення) розподіляють на **кутомірні** (пеленгаційні) та **різницево-далекомірні** (гіперболічні). Вимірювальні пристрої **пеленгаційного типу** використовують *пошукові* та *безпошукові способи* визначення напрямку на джерело ЕМВ, а потім і його МР.

3.2.3.2. Пошукові способи визначення напрямку на джерело ЕМВ

Пошукові способи пеленгації дозволяють визначити напрямок на джерело випромінювання шляхом послідовного огляду простору за допомогою спрямованої антени. Визначення пеленга потребує деякого часу.

Залежно від радіосигналу, використовуваного для визначення пеленга, методи радіопеленгації розподіляють на **амплітудні** та **фазові**.

Використовують такі *методи*:

пеленгація за максимумом діаграми спрямованості антени (ДСА);

пеленгації за мінімумом ДСА;

метод рівносигнального напрямку.

3.2.3.3. Безпошукові методи визначення напрямку на джерело ЕМВ

Реалізація безпошукового методу пеленгації передбачає огляд простору без сканування антенною системою. У найпростішому випадку безпошукове визначення напрямку на джерело випромінювання може бути здійснено за допомогою *багатоканального просторово-вибірною пристрою*. Він складається з антен (A), A_1 , A_2 , ..., A_N ; N – ціле число), кожна з яких під'єднана до свого приймача ($\text{Прм}1$, $\text{Прм}2$, ..., $\text{Прм}N$) з індикаторами (I_1 , I_2 , ..., I_N).

3.2.3.4. Триангуляційний метод визначення МР джерел ЕМВ

Триангуляційний (кутомірний) метод засновано на визначенні напрямків (пеленгів) на джерело ЕМВ у двох точках простору за допомогою радіопеленгаторів, рознесених на базу В (рис. 3.1).

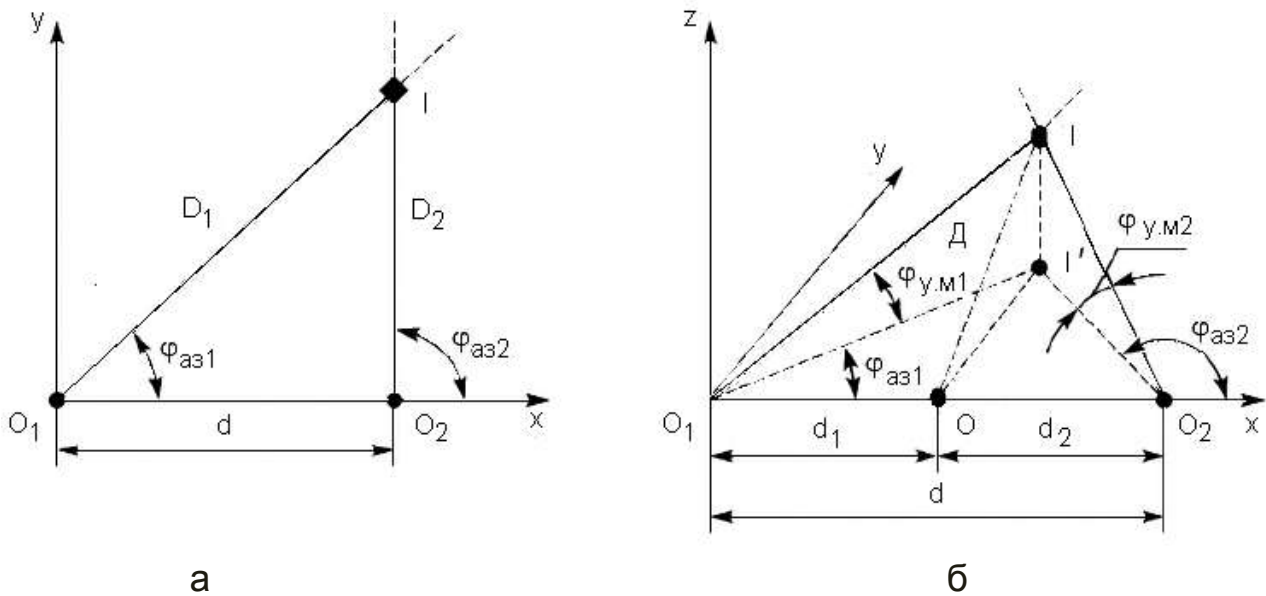


Рис. 3.1. Триангуляційний (кутомірний) метод визначення напрямків (пеленгів) на джерело ЕМВ: а – на площині; б – у просторі

3.2.3.5. Різницево-далекомірний метод визначення МР джерел ЕМВ

Різницево-далекомірний метод визначення місця розташування джерел ЕМВ засновано на вимірюванні за допомогою РЕЗ різниці відстаней від рознесених у просторі точок спостереження до джерела ЕМВ і побудови за ними відповідних гіпербол. Точка перетину двох гіпербол визначає МР джерела випромінювання. Для вирішення зазначеного завдання необхідно мати три рознесені у просторі точки спостереження (приймання): А1, А2, А3, що належать до різних баз.

3.2.3.6. Кутомірно-різницево-далекомірний метод визначення МР джерел ЕМВ

Кутомірно-різницево-далекомірний метод визначення місця розташування джерел ЕМВ передбачає вимірювання за допомогою РЕЗ різниці дальностей від джерела ЕМВ до двох рознесених пунктів приймання

та вимірювання напрямку на джерело випромінювання в одному із цих пунктів.

3.2.4. Способи визначення частоти сигналів розвідуваних радіоелектронних засобів

Для визначення носійної частоти розвідувальний приймач має приймати сигнали в усьому заданому діапазоні розвідуваних частот. Для виявлення радіосигналів за частотою й подальшого визначення їхніх носійних частот переглядають заданий діапазон. Перегляд можна здійснювати *послідовно в часі* або *одночасно у всьому діапазоні* частот.

Відповідно до цього розрізняють **пошукові** та **безпошукові способи** виявлення сигналів за частотою і визначення носійної частоти.

Пошуковий спосіб потребує відповідного часу на перегляд діапазону. Спосіб реалізують у панорамних одноканальних приймачах прямого посилення та супергетеродинних приймачах, перебудовуваних за частотою. Способи виявлення сигналу за частотою і визначення його носійної *за одночасного перегляду всього заданого діапазону* частот зазвичай реалізують у багатоканальних приймачах прямого посилення або супергетеродинного типу, приймачах оптико-електронного типу (із миттєвим перетворенням Фур'є) і приймачах функціонального типу (інтерференційні та кореляційні).

3.2.4.1. Безпошукові способи визначення частоти сигналів

За безпошукових способів виявлення сигналу за частотою й обчислення його носійної весь діапазон розвідуваних частот розподіляють системою вхідних (канальних) фільтрів на ряд піддіапазонів, ширину яких визначають пропускною здатністю (прозорістю) окремих фільтрів, які, приєднуючись один до одного, усі разом перекривають діапазон розвідуваних частот. Така побудова приймача забезпечує одночасне приймання сигналів у всьому діапазоні розвідуваних частот.

Виявлення сигналів розвідуваних РЕЗ та визначення їхніх носійних частот відбувається практично миттєво з імовірністю, що дорівнює одиниці.

Частоту прийнятого сигналу беруть такою, що дорівнює середній частоті смуги прозорості відповідного фільтра.

Точність вимірювання частоти й роздільну здатність за частотою визначають шириною смуги прозорості канального фільтра.

3.2.4.2. Інтерференційний вимірювач частоти

В основу інтерференційного способу визначення частоти покладено залежність напруги або струму на виході пристрою від носійної частоти сигналу.

Інтерференційний вимірювач має такі *переваги*:

практично миттєве вимірювання носійної частоти прийнятого сигналу;

порівняно широкий і регульований діапазон частотних вимірювань;
відносна простота використовуваної апаратури.

3.2.4.3. Кореляційний вимірювач частоти

В основу принципу роботи кореляційного вимірювача носійної частоти покладено залежність значення автокореляційної функції від частоти прийнятого сигналу.

3.2.4.4. Приймачі з реалізацією миттєвого перетворення Фур'є (МПФ)

Приймачі з МПФ використовують поєднання оптичних і радіоелектронних методів оброблення сигналів.

Ця схема, насправді, реалізує принцип побудови багатоканального за частотою приймача-спектроаналізатора.

Використання акустооптичної дифракції хвиль дозволяє здійснювати широкосмуговий спектральний аналіз сигналів без сканування за частотою.

Навіть під час одночасного приймання великої кількості сигналів можна здійснити аналіз широкосмугового спектра сигналів у реальному масштабі часу з високою роздільною здатністю за частотою та в широкому динамічному діапазоні.

3.2.5. Способи запам'ятовування носійної частоти радіоелектронних засобів

Метод, який зберігає значення носійної частоти прийнятих радіосигналів або забезпечує запам'ятовування її значень у вигляді відповідного коду протягом часу, необхідного для здійснення аналізу сигналу, називають *довготривалим запам'ятовуванням частоти*.

Метод, що дозволяє зберегти значення частоти сигналів на час, необхідний для настроювання передавача перешкод, називають *короткочасним запам'ятовуванням частоти*.

До кількісних характеристик пристроїв запам'ятовування частоти зараховують:

- час настроювання;
- час запам'ятовування (пам'яті);
- точність настроювання, точність утримання частоти;
- діапазон запам'ятовування;
- пропускну здатність (здатність одночасного настроювання кількох частот).

3.2.6. Аналіз структури сигналів розвідуваних радіоелектронних засобів

Під час ведення РР і РТР вимірюють параметри радіосигналів РЕЗ, які надають про них найбільш повне уявлення і дозволяють їх розпізнати. Так, у процесі аналізу *імпульсних РЕЗ* найбільший інтерес становлять часові параметри імпульсної послідовності: тривалість імпульсу; період (частота) повторення імпульсів; період (пачка) імпульсів; тривалість серії (пачки) імпульсів; кількість імпульсів у пачці; закони (види) внутрішньоімпульсної модуляції; імпульсні коди; частота та вид сканування антени.

У процесі приймання *безперервних сигналів* визначають вид і параметри модуляції; часові; спектральні й кореляційні характеристики модульованих сигналів.

Виміряні параметри радіосигналів використовують безпосередньо оператором або ЕОМ для з'ясування цінності здобутої інформації, розпізнавання РЕЗ або записують і зберігають у пристроях оперативної та довготривалої пам'яті.

Вимірювачі параметрів розподіляють на аналогові, цифрові й комбіновані.

Аналогова апаратура забезпечує подання параметрів сигналів у вигляді відповідних функціональних залежностей.

Цифрова апаратура виробляє дискретні кодові сигнали, відповідні виміряним параметрам. Подання вихідної інформації здійснюють у цифровій формі.

Комбінована апаратура містить у різних поєднаннях аналогові й цифрові вимірювачі параметрів з індикацією результатів вимірювань як в аналоговій, так і цифровій формі.

Для запам'ятовування виміряних параметрів сигналів для їхнього подальшого аналізу й розпізнавання образу РЕЗ застосовують такі *способи реєстрації*:

- перетворення на цифровий код і введення у пристрій;
- запис на магнітну стрічку або фотоплівку;
- виведення на екран ЕПТ із фотографуванням екрана;
- запис електрохімічним, електротермічним та іншими методами.

3.2.6.1. Визначення виду й параметрів модуляції безперервних сигналів

Під час ведення РР і РТР, крім вимірювання часових параметрів імпульсних послідовностей, доводиться визначати вид і параметри модуляції безперервних сигналів.

У сучасних РЕЗ широко використовують *амплітудно та частотно-модульовані радіосигнали*. Визначити вид модуляції, зазвичай, нескладно. Для цього необхідно прийнятий сигнал подати на амплітудний (АД) і частотний (ЧД) детектори (у другому випадку попередньо обмеживши за амплітудою).

3.2.6.2. Визначення частоти сканування антени РЛС автоматичного супроводження цілей

Важливими характеристиками РЛС автоматичного супроводження цілей (АСЦ) є вид і параметри сканування антени.

Для визначення кутових координат і автоматичного супроводження цілі у РЛС АСЦ зазвичай використовують метод кінчного сканування, за якого інформація про координати цілі міститься в обвідній прийнятих радіосигналів і її фазі. Частота обвідної прийнятого сигналу відповідає частоті сканування антени РЛС АСЦ. Знання частоти сканування антени дозволяє створити перешкоду на цій частоті й тим самим порушити режим автоматичного супроводження цілі.

3.2.6.3. Визначення форми діаграми спрямованості антени

Форму й ширину діаграми спрямованості антени (ДСА) визначають у *горизонтальній і вертикальній площинах*.

Форму ДСА можна досліджувати за допомогою *панорамного приймача*. Сигнали, прийняті його антеною, після перетворення й посилення подаються на вертикально відхильну систему. Промінь, переміщаючись екраном ЕПТ, утворює розгорнуте зображення ДСА.

За спостережуваним зображенням визначають форму ДСА, кут розкриття основної пелюстки, а також оцінюють розмір бічних пелюсток.

Ширину ДСА можна визначити, вимірюючи швидкість обертання антени та тривалість серії імпульсів, тобто час, протягом якого антена розвідуваних РЕЗ опромінює цей напрямок.

3.2.6.4. *Визначення поляризації випромінювання*

У РЕР використовують такі *види поляризації* випромінювання: лінійну горизонтальну і вертикальну; таку, що обертається (колову, еліптичну).

Під час ведення розвідки в метровому й дециметровому діапазонах довжин хвиль поляризацію випромінювання, що приймається, визначають за допомогою двох взаємно перпендикулярних антен (із горизонтальною та вертикальною поляризацією).

Послідовно під'єднуючи антени до приймально-індикаторних пристроїв, спостерігають прийнятий сигнал. Про поляризацію випромінювання судять за максимальним рівнем одного із сигналів, що приймаються антенами. Поляризацію можна визначити й за допомогою однієї антени, наприклад, півхвильового вібратора. Обертаючи вібратор у вертикальній площині, визначають його положення, за якого спостерігають максимум сигналу, що й відповідає його поляризації.

У сантиметровому діапазоні довжин хвиль поляризацію сигналу визначають за допомогою **поляризаційних фільтрів**, розміщених у хвилеводі, що з'єднує антену та приймач. Поляризаційні фільтри забезпечують проходження сигналу тільки з певним видом поляризації.

3.2.7. *Аналіз спектрів радіосигналів*

Спектр радіосигналу в деякому діапазоні частот визначають сукупністю амплітуд напруг різних частот. Отже, пристрої аналізу спектрів мають забезпечувати вимірювання амплітуди й частоти кожної складової

досліджуваного процесу. У процесі частотного аналізу періодичний сигнал може бути подано рядом Фур'є.

Періодичні сигнали завжди мають дискретні спектри, утворені рівновіддаленими спектральними складовими.

Для аналізу спектрів радіосигналів використовують *цифрові й аналогові спектроаналізатори*.

3.2.7.1. Цифровий аналізатор спектра

Для аналізу спектра цифровим аналізатором використовують алгоритм *дискретного перетворення Фур'є (ДПФ)*, який дозволяє перелічити сукупність часових відліків у комплексний дискретний спектр. У сукупності коефіцієнтів C_k такого перетворення міститься вся інформація про розподіл енергії сигналу за частотами. Цифрові методи аналізу дозволяють також обчислити *фазо-частотний спектр (ФЧС)* аналізованого процесу. Коефіцієнти ФЧС широко використовують для відновлення часових характеристик одного або декількох вузькосмугових сигналів з усієї сукупності випромінювань, що потрапляють у смугу аналізу. ФЧС радіосигналів можна використовувати під час розпізнавання РЕЗ.

Нині розроблено алгоритми, що дозволяють значно зменшити обсяг обчислень. Такі алгоритми дістали назву *швидкого перетворення Фур'є (ШПФ)*. Результати остаточного обчислення спектра сигналу можуть відображатися на екрані ЕПТ.

Максимальну роздільну здатність цифрового аналізатора спектра визначають тільки максимально можливою тривалістю T оброблюваної реалізації. Наявні цифрові аналізатори спектра дозволяють здобувати роздільну здатність десяті й соті частки герца.

3.2.7.2. Аналогові пристрої спектрального аналізу

Аналогові спектральні аналізатори розподіляють на пристрої паралельного, послідовного та комбінованого типу.

Сутність *паралельного частотного аналізу* полягає в тому, що всі складові в певній смузі частот, названій смугою огляду, виявляють одночасно та практично миттєво.

Точність вимірювання частот спектральних складових визначають шириною смуги пропускання окремого фільтра. Загальна кількість

фільтрів має бути такою, щоб їхня сумарна смуга пропускання відповідала смузі огляду.

Послідовний спектральний аналіз полягає в тому, що частотні складові досліджуваного сигналу в певній смузі частот (огляду) виявляють послідовно. У пристроях послідовного аналізу широко використовують панорамні приймачі з перебудовою резонатора та із переміщенням спектра по осі частот.

У процесі дослідження *швидкозмінних процесів* або радіовипромінювань РЕЗ, що короткочасно працюють, послідовний аналіз можливий тільки в разі їхнього періодичного повторення. Водночас періодичність повторення має бути вищою або порівнянна з періодом перегляду смуги огляду.

Комбінований частотний аналіз засновано на комплексному використанні в одному панорамному приймачі паралельного й послідовного аналізаторів спектра. У процесі комбінованого аналізу можна реалізувати переваги кожного аналізатора, поєднуючи їх у різних варіантах. Наприклад, аналіз здійснюють одночасно за допомогою великої кількості фільтрів, але напругу з них знімають послідовно (по черзі). Комбінований аналіз використовують, якщо необхідно скоротити час або послідовний аналіз є неможливим через дуже широку загальну смугу огляду.

Контрольні запитання

1. У чому полягає особливість основних випромінювань?
2. Що таке "вторинні ЕМВ"?
3. Які завдання дозволяє вирішувати радіоелектронна розвідка?
4. Для вирішення яких завдань використовують засоби РТР?
5. Які параметри підлягають вимірюванню під час ведення РР?
6. Для цього використовують аналізатор параметрів сигналу?
7. У чому полягає сутність пошукових способів визначення частоти сигналів?
8. Для чого використовують поляризаційні фільтри?
9. Що таке "фазо-частотний спектр аналізованого процесу"?
10. У чому полягає сутність комбінованого частотного аналізу?
11. У чому полягає сутність послідовного спектрального аналізу?
12. Від чого залежить точність вимірювання частот спектральних складових?
13. Як розподіляють аналогові спектральні аналізатори?

4. Фізичні основи захисту від радіолокаційної розвідки

Мета: розглянути основні поняття радіолокаційної розвідки, фундаментальні закони та концепції електромагнітного поля, основні характеристики апаратури, основні поняття радіолокаційної розвідки, фізичні основи захисту від радіолокаційної розвідки; виявити об'єкти в радіолокації.

Основні питання

4.1. Основні поняття.

4.2. Загоризонтні радіолокаційні станції.

Ключові слова: радіолокаційна розвідка; виявлення об'єктів у радіолокації; вимірювання відстаней до об'єкта; імпульсний, частотний і фазовий методи вимірювання відстані; визначення напрямку на об'єкти; видова та параметрична радіолокаційна розвідка.

Професійні компетентності:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

здатність розуміти основні напрями, цілі, фундаментальні принципи радіолокаційної розвідки; фізичні основи захисту від радіолокаційної розвідки з погляду захисту інформації.

Рекомендована література [1; 9; 12; 17].

4.1. Основні поняття

Радіолокаційна розвідка (РЛР) – це активний різновид РЕР, що забезпечує здобування інформації шляхом опромінення об'єктів і навколишнього середовища зондувальними радіосигналами з подальшим прийманням та аналізом частини розсіяного об'єктами зондувального випромінювання.

РЛР розподіляють на видову та параметричну.

Видова РЛР забезпечує здобування інформації, що міститься в зображеннях різних об'єктів місцевості.

Параметричну РЛР пов'язано зі здобуванням інформації, яка міститься у просторових, швидкісних і відбивних характеристиках космічних, повітряних, наземних і морських об'єктів.

РЛР *призначено* для виявлення, визначення координат і параметрів руху наземних, повітряних та космічних об'єктів; радіолокаційного знімання території, із метою картографування місцевості; визначення метеоумов у заданих районах.

Для ведення РЛР застосовують в основному *п'ять типів РЛС*:

бічного огляду, що встановлюють на космічних і повітряних носіях і забезпечують здобування видової інформації про місцевість та об'єктів, над якими пролітає носій апаратури;

наземні загоризонтні, призначені для виявлення цілей, що низько літають, і запусків балістичних ракет (БР);

виявлення об'єктів у космічному просторі;

розвідки рухомих наземних цілей і засікання мінометних та артилерійських позицій за розрахованою траєкторією польоту снаряда;

розвідки метеоумов у заданих районах.

Широке застосування РЛС для ведення розвідки обумовлено рядом *переваг* радіолокаційного спостереження:

можливістю ведення розвідки в будь-яких погодних умовах;

ведення розвідки, що не залежить від освітленості земної поверхні, що забезпечує можливість спостереження в будь-який час доби;

можливістю спостереження об'єктів, замаскованих від оптичної розвідки;

можливістю селекції рухомих об'єктів на фоні нерухомих предметів, що створюють несприятливі сигнали;

можливістю виявлення об'єктів на великих відстанях (сотні й тисячі кілометрів).

Основні характеристики апаратури РЛС:

носійна частота або довжина хвилі випромінюваних коливань;

тривалість і період проходження імпульсів;

середня й пікова потужність зондувального випромінювання;

форма та ширина діаграми спрямованості антени (ДСА), коефіцієнт посилення антени;

закони сканування ДСА у просторі;

чутливість приймального пристрою;

роздільна здатність за дальністю та кутовими координатами;

точність вимірювання координат об'єктів.

Довжина хвилі є основною характеристикою випромінювання РЛС. Здебільшого сучасні РЛС працюють у діапазоні частот від 75 до 30 000 МГц

(від 0,8 до 400 см). Виняток становлять загоризонтні РЛС, що працюють у діапазоні коротких хвиль.

Тривалість зондувальних сигналів і період їхнього проходження визначають можливості РЛС за роздільною здатністю та дальністю дії, а також можливість роботи РЛС у різних умовах.

Сучасні РЛС випромінюють імпульси тривалістю від сотих часток наносекунди до мілісекунди.

Потужність випромінювання РЛС у межах ДСА є неоднаковою. Вона має найбільше значення вздовж осі ДСА й убуває в разі відхилення від осі.

Коефіцієнт підсилення антени (коефіцієнт спрямованості антени) РЛС показує, у скільки разів підвищується густина випромінювання електромагнітної енергії по осі радіопроменя, порівняно з рівномірним випромінюванням потужності передавача в усіх напрямках.

Коефіцієнт посилення антени залежить від довжини хвилі випромінювання. Найбільшого значення досягають у діапазоні сантиметрових і міліметрових хвиль.

Чутливість приймача РЛС характеризується найменшою потужністю прийнятого антеною сигналу, позначку якого ще можна виявити на екрані індикатора на фоні шумів. Приймачі сучасних РЛС мають чутливість $10^{-11} - 10^{-14}$ Вт.

Роздільна здатність за дальністю характеризує мінімальну відстань між двома об'єктами на місцевості (узятє в напрямку на РЛС), за якого ці об'єкти ще спостерігають роздільно на екрані індикатора.

Роздільна здатність за напрямом (азимута) визначає мінімальний кут у горизонтальній площині, за якого два сусідні об'єкти, розміщені на дузі одного радіуса від станції, спостерігають роздільно. Роздільну здатність за азимутом визначає ширина ДСА в горизонтальній площині.

Аналогічно *роздільну здатність за кутом місця* (у вертикальній площині) будуть визначати шириною ДСА у вертикальній площині.

4.1.1. Параметрична радіолокаційна розвідка

Параметричну радіолокаційну розвідку (ПРЛР) призначено для виявлення, визначення координат і параметрів руху космічних, повітряних та наземних об'єктів, визначення метеоумов у заданих районах.

Радіолокаційні методи визначення координат об'єктів засновано на використанні *явища відбивання радіохвиль від кордонів двох середовищ*, що володіють різними електричними властивостями.

Для визначення координат об'єктів радіолокаційними методами використовують **радіолокаційні станції**.

На рис. 4.1 наведено блок-схему типової РЛС із загальною приймально-передавальною антеною.



Рис. 4.1. Блок-схема типової РЛС із загальною приймально-передавальною антеною

За допомогою РЛС, установленної в точці А, положення об'єкта у просторі може бути повністю визначено трьома його координатами:

- 1) похилою дальністю;
- 2) азимутом, тобто кутом між меридіаном і напрямком на об'єкт у горизонтальній площині;
- 3) кутом місця, тобто кутом між горизонтальною площиною, що проходить через станцію радіолокації, і напрямком на об'єкт у вертикальній площині.

Замість кута місця як третю координату можна визначати *висоту об'єкта*, тобто відстань від об'єкта до горизонтальної площини, що проходить через станцію радіолокації.

Радіолокаційну станцію може бути розраховано на визначення як трьох, так і двох і навіть однієї з координат об'єктів.

4.1.1.1. Виявлення об'єктів у радіолокації

Як для виявлення об'єкта, так і для визначення його координат потужність відбитого сигналу на вході приймача радіолокаційної станції має бути не нижчою за *порогову потужність приймача*.

Пороговою будуть називати мінімальну потужність сигналу, яку треба підвести до входу погодженого з антеною приймача для нормального приймання. Тому дуже важливо знати, чим визначено значення потужності відбитого сигналу.

Потужність відбитого сигналу залежить від:

умов поширення радіохвиль;

потужності, випромінюваної передавальним пристроєм;

коефіцієнта спрямованості передавальної $G_{\text{пер}}$ і приймальні $G_{\text{пр}}$ антен;

розмірів об'єкта, що відбиває;

відстані між об'єктом і радіолокаційною станцією.

Середні значення еквівалентної площі розсіювання S різних об'єктів наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Середні значення еквівалентної площі розсіювання різних об'єктів

Об'єкти	м ²
Літак-винищувач	10
Легкий бомбардувальник	25
Важкий бомбардувальник	150
Снаряд калібром 75 мм	1
Невеликий підводний човен у незануреному стані	40
Великий корабель	15 000

4.1.1.2. Вимірювання відстаней до об'єктів

Вимірювання відстаней до об'єкта – одне з основних завдань радіолокації. Іноді воно є єдиним завданням станцій, наприклад, різних радіодалекомірів, висотомірів тощо.

У радіолокації можна використовувати три *методи вимірювання відстаней*:

- 1) імпульсний;
- 2) частотний;
- 3) фазовий.

В основі всіх трьох методів лежать явища, обумовлені *кінцевою швидкістю поширення радіохвиль у просторі*.

4.1.1.3. Імпульсний метод вимірювання відстані

Імпульсний метод – основний метод, застосовуваний у радіолокації для вимірювання відстані до об'єкта.

В *імпульсному методі* вимірювання відстані передавач радіолокаційної станції періодично випромінює короточасні зондувальні радіоімпульси (серії коливань високої частоти), розділені щодо великими інтервалами часу (паузами). Зондувальні радіоімпульси доходять до опромінюваних об'єктів і від'єднують від них. Приймач радіолокаційної станції зазвичай від'єднують від антени на час випромінювання передавачем зондувальних радіоімпульсів. У паузах між посиленням зондувальних радіоімпульсів приймач під'єднують до антени та веде приймання імпульсів, відбитих від об'єктів.

Відстань до об'єкта визначають вимірюванням часом від моменту випромінювання зондувального радіоімпульсу до приймання відповідного відбитого радіоімпульсу.

Перевагою імпульсного методу є простота одночасного вимірювання відстані до великої кількості об'єктів за достатньої роздільної здатності та точності вимірювання відстані (до 10 – 15 м).

Основний *недолік* імпульсного методу – неможливість вимірювання дуже малих відстаней.

4.1.1.4. Частотний метод вимірювання відстані

Під час вимірювання відстані методом безперервного випромінювання один із параметрів безперервного коливання змінюється за певним законом (частота або фаза). На цьому принципі працюють багато радіовисотомірювачів.

Передавач із *частотною модуляцією* випромінює коливання, які опромінюють об'єкт і викликають появу відбитих радіохвиль.

Переваги методу безперервного випромінювання із частотною модуляцією – можливість вимірювання дуже малих відстаней і простота апаратури, обумовлена її вузькосмуговістю.

Недоліком методу є відносна складність одночасного визначення відстаней до декількох об'єктів, що опромінюються станцією.

4.1.1.5. Фазовий метод вимірювання відстані

Під час вимірюванні відстані у РЛС із безперервним випромінюванням можна використовувати фазовий метод.

Сутність *фазового методу* вимірювання відстані полягає в такому. Нехай у точці А розміщено радіолокаційну станцію, об'єкт розташовано в точці Б, відстань від радіолокаційної станції до об'єкта R. Передавач безперервно випромінює радіохвилі частотою f у напрямку об'єкта. У приймач надходять два сигнали: прямий – безпосередньо від передавача та відбитий – від об'єкта.

Різниця фаз коливань прямого та відбитого сигналів, обумовлена кінцевою швидкістю поширення радіохвиль, залежить від відстані до об'єкта, що відбиває. Цю залежність покладено в основу фазового методу вимірювання відстаней.

Основні *переваги* фазового методу вимірювання відстаней є такими:

1) можливість вимірювання дуже малих відстаней. Найменші розрізнявані відстані залежать, головним чином, від роздільної здатності апаратури, що вимірює мінімальні фазові зрушення коливань, які зіставляють;

2) досить висока точність вимірювання. Для цього бажано працювати на максимально коротких хвилях і вимірювати різниці фаз, що перевищують 2 π .

4.1.1.6. Визначення напрямку на об'єкти

Здебільшого РЛС має визначати не тільки дальність, а й напрямок на об'єкт. Визначення напрямку на об'єкт називають *пеленгацією* та зводять до встановлення кутових координат об'єкта: *азимута* й *кута місця*.

Як відомо, є три основні методи визначення напрямків на об'єкт:

максимуму сигналу;

мінімуму сигналу;

рівносигнального напрямку.

Застосування зазначених методів визначення азимута під час ведення розвідки радіолокації мало відрізняється від відповідних методів радіо- і радіотехнічної розвідки.

Третьою координатою, що визначає просторове положення об'єкта, є *кут місця* або *висота*. Досить знати одну із цих величин, іншу за необхідності завжди можна знайти тригонометричним методом за похилою дальністю.

Методи визначення кута місця (висоти) об'єктів можна розподілити на дві групи:

а) методи, у яких як корисну властивість використовують відбивання сигналів від земної поверхні;

б) методи, у яких відбивання сигналів від Землі не використовують і навіть, навпаки, є шкідливим.

Першу групу методів застосовують переважно на більш довгих хвилях радіолокаційного діапазону (метрових хвилях), де антени не мають достатньо високої спрямованості, і *доводиться зважати на відбивання від земної поверхні*.

Другу групу використовують переважно в діапазоні найбільш коротких хвиль радіолокаційного діапазону (сантиметрових хвилях), де високий ступінь концентрації променя антени *дозволяє усунути вплив земної поверхні на форму діаграми спрямованості*.

4.1.1.7. Одночасне визначення відстані, азимута й кута місця

У багатьох практичних випадках, особливо під час спостереження за повітряними об'єктами, необхідно визначати швидко й надійно всі три координати об'єкта: відстань, азимут і кут місця.

Відстані зазвичай визначають імпульсним методом.

Для пошуку кутових координат можна використовувати будь-яку комбінацію методів, застосовуваних для визначення азимута та кута місця.

Пристрої, що забезпечують визначення трьох координат, є на всіх хвилях радіолокаційного діапазону: метрових, дециметрових і сантиметрових. Однак переважного поширення набули пристрої сантиметрового діапазону як більш точні й компактні.

Водночас визначення кутових координат здійснюють методом максимуму за допомогою *голкоподібного променя*, що повертається за азимутом і кутом місця.

Такий метод дає досить високу точність визначення кутових координат і, крім того, дозволяє підвищити дальність дії радіолокаційної

станції шляхом високої концентрації енергії випромінювання у вузькому промені.

Є різні види огляду простору голкоподібним променем. Найбільш поширеними з них є такі:

- 1) гвинтовий;
- 2) пилкоподібний;
- 3) зигзагоподібний;
- 4) спірально-конічний;
- 5) поступально-конічний.

4.1.2. Видова радіолокаційна розвідка

Видову радіолокаційну розвідку ведуть за допомогою *радіолокаційних станцій бокового огляду*. Нині є два основні типи радіолокаційних станцій бокового огляду (РЛС БО):

- з уздовжфюзеляжною антеною (РФА);
- із синтезованою апертурою (РСА).

4.1.2.1. РЛС з уздовжфюзеляжною антеною

У РЛС БО РФА для підвищення роздільної здатності або азимута використовують довгу приймально-передавальну антену, що дозволяє сформувати в азимутальній площині вузьку діаграму спрямованості. Довжина антени зазвичай досягає 10 – 15 м, що за робочої довжини хвилі $\lambda = 3$ см дозволяє сформувати діаграму спрямованості (ДС) завширшки близько 10 кутових хвилин і забезпечити лінійну роздільну здатність десятки метрів.

4.1.2.2. РЛС із синтезованою апертурою антени (РСА)

Радіолокатори із РФА дозволяють діставати детальні радіолокаційні зображення тільки на щодо невеликих відстанях. У разі винесення смуги розвідки на десятки кілометрів від літака необхідно використовувати антени завдовжки десятки й сотні метрів, розміщення яких на літаку є неможливим.

Для подолання цього утруднення використовують **метод синтезування апертури антени**, який полягає в запам'ятовуванні відбитих від

цілі сигналів на ділянці траєкторії польоту, довжина якого дорівнює необхідній довжині антени. Подальше оброблення зареєстрованих сигналів у бортовій або наземній апаратурі дозволяє дістати радіолокаційне зображення з *високою детальністю*.

Принцип формування синтезованої апертури антени з вузькою ДС в азимутальній площині полягає у *створенні штучної антенної ґратки*. Одним з основних умов її створення є точна прямолінійна траєкторія польоту літака.

Оброблення прийнятих сигналів і формування радіолокаційного зображення можливі трьома різними способами:

- 1) антенним;
- 2) селекцією сигналів за доплерівськими частотами;
- 3) голографічним (пов'язаним з оптичним обробленням сигналу).

Найбільшого поширення нині дістали оптичні методи оброблення сигналу. В основі оптичних пристроїв оброблення лежить **голографічний метод**, за якого записані на плівку радіосигнали (радіоголограми) використовують для формування зображення.

Оптична голографія дозволяє забезпечити *надзвичайно високу роздільну здатність*, тому що довжина хвилі світлового випромінювання є в багато разів меншою розміру голограми. Одна з важливих властивостей голограми полягає в можливості зміни масштабу зображення.

4.2. Загоризонтні радіолокаційні станції

4.2.1. Загальні відомості

В основу принципу дії загоризонтних радіолокаційних станцій (ЗГ РЛС) покладено наддалеке поширення радіохвилі шляхом тропосферного розсіювання, рефракційних явищ в іоносфері та відбивання від іонізованих метеорних слідів.

4.2.1.1. Механізми поширення радіохвиль

Радіохвилі за способом поширення розподіляють на такі, що поширюються у вільному просторі (прямі), земні, тропосферні та іоносферні.

Радіохвилі, що поширюються в однорідному або слабконеоднорідному середовищі (зокрема, у космічному просторі) за прямолінійними

або близькими до них траєкторіями, називають *вільнопоширюваними*, або **прямими хвилями**. На їхнє поширення не позначається вплив Землі, але під час проходження крізь атмосферу їхня траєкторія може незначно скривлюватися (*явище рефракції*), можливі розсіювання та поворот площини поляризації.

Земні радіохвилі – це радіохвилі, що поширюються в безпосередній близькості від поверхні Землі та частково огинають земну кулю, унаслідок дифракції (дифракційні хвилі).

Радіохвилі, що поширюються на значні (приблизно до 1 000 км) відстані через розсіювання у тропосфері та напрямної (хвилевідної) дії тропосфери, називають **тропосферними**.

Радіохвилі, що поширюються на великі відстані й огинають земну кулю в результаті однократного або багаторазового відбивання від іоносфери ($\lambda > 10$ м), а також хвилі, які розсіюються на неоднорідностях іоносфери та відбиваються від іонізованих слідів метеорів (у діапазоні метрових хвиль), називають **іоносферними**, або **просторовими**.

Ділянка прямої видимості простягається до радіогоризонту та в загальному випадку характеризується наявністю хвиль трьох типів – прямої, відбитої від земної поверхні й поверхневої (земної).

За радіогоризонтом слідують *області півтіні й тіні* – ділянки земної поверхні, де відсутня пряма хвиля, а поширення відбувається шляхом огинання хвилею земної поверхні або нерівності рельєфу місцевості.

Ділянка далекого тропосферного поширення радіохвиль простягається від 100 до 1 000 км. Поширення хвиль у цій ділянці відбувається шляхом розсіювання у тропосфері.

Як *тропосферні* можуть переважно поширюватися хвилі в діапазоні 40 – 10 000 МГц. Рівень сигналу в разі далекого тропосферного розсіювання є схильним до добових і сезонних змін та залежить від виду підстильної поверхні, метеорологічної обстановки, довжини хвилі, властивостей антен, довжини траси, географічного положення РЕЗ тощо.

У *ділянці іоносферного розсіювання* хвилі поширюються через розсіювання на неоднорідностях іоносфери. Розсіювання може відбуватися також через відбивання від іонізованих слідів метеорів. Ділянка іоносферного розсіювання простягається на відстань 800 – 2 400 км.

Іоносферу утворюють верхні шари земної атмосфери, у якій газиста частково (до 1 %) є іонізована під впливом ультрафіолетового, рентгенівського та сонячного корпускулярного випромінювань.

Іоносфера є *електрично нейтральною*, вона містить однакову кількість позитивних і негативних частинок, тобто є **плазмою**. Досить велика іонізація, що робить вплив на поширення радіохвиль, починається на висоті 60 км (шар D), збільшується до висоти 300 – 400 км, утворюючи шари E, F1, F2, а потім повільно убуває (рис. 4.2).

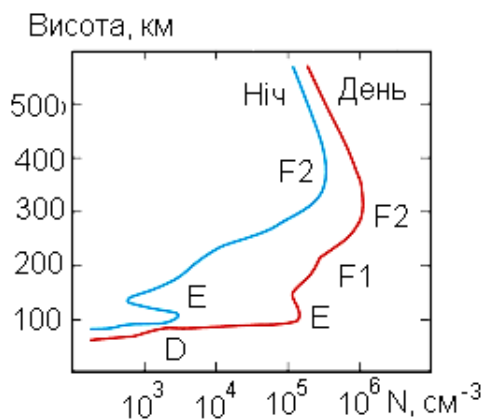


Рис. 4.2. Розподіл концентрації електронів N в іоносфері

Максимальна концентрація електронів відповідає шару F2. Залежність концентрації електронів від висоти змінюється із часом доби, порою року, сонячною активністю, а також широтою та довготою.

Метеорні відбивання радіохвилі пов'язано з тим, що метеорні частинки під час потрапляння в атмосферу згорають, залишаючи в ній сліди з підвищеною концентрацією іонів. Такі іонізовані сліди утворюють короточасні спрямовані екрани, здатні відбивати радіосигнали. Оскільки такі екрани мають гостру діаграму спрямованості, відбитий сигнал характеризується високою точністю приходу в певну точку. Відомо, що метеорити масою понад 0,001 г проникають в іоносферу з інтенсивністю до 100 млн на добу, а найбільш придатні для радіолокації та зв'язку метеорні сліди утворюються на висотах 80 – 120 км.

4.2.1.2. Особливості поширення коротких хвиль

Подібно довгим і середнім, короткі хвилі (декаметрові) можуть поширюватися як земні та іоносферні.

Унаслідок значного поглинання коротких хвиль у напівпровідній поверхні Землі, земні хвилі поширюються на відстані, що не перевищують декількох десятків кілометрів (для більш коротких хвиль діапазону).

У разі поширення як *іоносферних*, тобто шляхом одноразового або багаторазового відбивання від іоносфери, короткі хвилі можна використовувати для зв'язку на скільки завгодно великих відстанях, оскільки під час відбивання від іоносфери вони поглинаються слабо, на відміну від поглинання ґрунтом.

Застосовувані для радіозв'язку й радіолокації на великих відстанях короткі хвилі зручно розподілити на три піддіапазони:

- а) денні хвилі (від 10 до 25 м);
- б) нічні хвилі (від 35 до 100 м);
- в) проміжні хвилі (від 25 до 35 м), що використовують у напівосвітлений період.

4.2.2. Принципи роботи загоризонтних РЛС

В основу принципу дії загоризонтних (ЗГ) РЛС покладено здатність радіохвиль декаметрового діапазону поширюватися за лінію видимого горизонту за допомогою поверхневої (земної) або просторової (шляхом іоносферної рефракції) хвилі.

Є два типи ЗГ РЛС – зі **зворотним і прямим розсіюванням радіохвильі**.

Перший різновид, що використовує метод зворотно-похилого зондування, є імпульсно-доплерівською однопозиційною РЛС.

Другий – двопозиційна (із рознесеними передавачем і приймачем) РЛС із безперервним випромінюванням.

ЗГ РЛС зі зворотно-похилим зондуванням забезпечує спостереження за повітряним і космічним простором, прилеглим до величезних площ, що в кілька десятків разів перевищують площі, які відповідають зонам огляду звичайних РЛС.

Перевага ЗГ РЛС полягає в тому, що вони здатні виявити цілі над районами, практично недосяжними для звичайних РЛС (наприклад, над океанами).

Іншими перевагами ЗГ РЛС вважають практично повну невразливість від протирадіолокаційних ракет і труднощі створення (у робочому діапазоні частот РЛС) покриттів літаків, що поглинають радіолокаційні сигнали та знижують імовірність їхнього виявлення.

Виконують також роботи з експериментального дослідження та проектування ЗГ РЛС, які використовують для виявлення повітряних цілей *поверхневу хвилю*. Це викликано принциповою можливістю застосування

їх для виявлення низьколетючих літаків, КР і балістичних ракет підводних човнів.

РЛС, засновані *на принципі рознесеного приймання*, можуть бути **бістатичними та багатопозиційними**.

У першому разі використовують один передавач і один приймач, які розміщують на різних позиціях.

У багатопозиційних РЛС використовують кілька передавальних і приймальних пристроїв, рознесених у просторі й пов'язаних між собою широкосмуговими лініями. Важливою умовою нормального функціонування таких РЛС є синхронізація роботи всіх пристроїв системи.

Одним із перспективних варіантів багатопозиційних РЛС вважають *систему зі змінною базою* (під нею розуміють відстань між приймачем і передавачем).

У разі застосування методу *пасивної багатопозиційної радіолокації* інформацію про повітряні цілі здобувають за допомогою спеціалізованої приймальної станції з відбитих від повітряних цілей сигналів широкомовних телевізійних або УКХ-радіопередавачів, що функціонують у районі польотів. Отже, повністю відпадає необхідність у використанні активних РЛС. Випромінювання радіо- і телевізійних засобів, що працюють практично цілодобово, забезпечують перекриття навколорозземного простору на значній відстані. Приймальна станція водночас буде виявляти, розпізнавати й супроводжувати такі потенційні цілі, як, наприклад, літаки, гелікоптери, крилаті ракети шляхом виділення та оброблення відбитих від них сигналів.

Переваги способу виявлення повітряних цілей для районів із високорозвиненою інфраструктурою теле- і радіомовлення є очевидними.

Контрольні запитання

1. Що забезпечує радіолокаційна розвідка?
2. Які п'ять типів РЛС застосовують переважно для ведення РЛР?
3. Які переваги радіолокаційного спостереження надає використання РЛС для ведення розвідки?
4. Які основні характеристики апаратури РЛС?
5. Для вирішення яких завдань призначено параметричну радіолокаційну розвідку?
6. На які типи розподіляють радіохвилі за способом поширення?
7. Що є основною перевагою імпульсного методу в радіолокації?

8. На якому принципі працюють багато сучасних радіовисотомірювачів?

9. У чому полягає сутність фазового методу вимірювання відстані до об'єкта розвідки?

10. Якими є основні переваги фазового методу вимірювання відстаней до об'єкта розвідки?

11. Які є три основні методи визначення напрямків на об'єкт розвідки?

12. Які є найбільш поширені види огляду простору голкоподібним променем?

13. За використання яких радіолокаційних станцій ведуть видову радіолокаційну розвідку?

5. Фізичні основи захисту від акустичної та гідроакустичної розвідки

Мета: розглянути основні поняття й походження акустичної та гідроакустичної розвідки, основні напрями, цілі, принципи й завдання акустичної та гідроакустичної розвідки; основні характеристики акустичного поля й методи його опису; загальні відомості про закладні пристрої та пристрої перехоплення мовної інформації.

Основні питання

5.1. Фізичні основи захисту від гідроакустичної розвідки.

5.2. Фізичні основи захисту від акустичної розвідки.

5.3. Загальні відомості про закладні пристрої та пристрої перехоплення мовної інформації.

Ключові слова: технічна розвідка; акустична та гідроакустична розвідка; гідролокатор; акустичні випромінювання; активні гідроакустичні засоби; інформативний сигнал; акустичні та гідроакустичні перешкоди; просторово-часові параметри середовища поширення сигналів; закладні пристрої та пристрої перехоплення мовної інформації.

Професійні компетентності:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

здатність розуміти основні напрями, цілі, фундаментальні принципи акустичної та гідроакустичної розвідки; фізичні основи захисту від акустичної та гідроакустичної розвідки з погляду захисту інформації.

Рекомендована література [1; 9; 12; 17].

5.1. Фізичні основи захисту від гідроакустичної розвідки

5.1.1. Основні поняття

Під гідроакустичної розвідкою (ГАР) розуміють здобування інформації шляхом приймання й аналізу акустичних сигналів інфразвукового, звукового та ультразвукового діапазонів, що поширюються у водному середовищі від надводних і підводних об'єктів.

За принципом використання енергії акустичного випромінювання засоби ГАР розподіляють на активні (гідролокатори) та пасивні.

Гідролокатор працює на принципі випромінювання у водному середовищі зондувальних акустичних сигналів із подальшим прийманням та аналізом відбитих від об'єктів і морського дна ехо-сигналів.

Під час ведення **пасивної ГАР** використовують шумопеленгатори, які приймають та аналізують *шумові акустичні випромінювання* у водному середовищі, що виникають у ході роботи двигунів, гребних валів, машин і механізмів різних агрегатів надводних кораблів (НК), підводних човнів (ПЧ) та інших плавзасобів, а також засоби розвідки, призначені для приймання й аналізу акустичних сигналів, створюваних гідролокаторами, ехолотом, системами гідроакустичного зв'язку та ін.

ГАР вирішує такі *основні завдання*:

визначення параметрів первинних шумових полів об'єктів, що функціонують у водному середовищі, із метою виявлення їхніх класифікаційних ознак;

визначення параметрів випромінювання активних гідроакустичних засобів (ГАЗ) кораблів мінно-торпедної зброї та засобів гідроакустичного придушення, із метою здобування даних, необхідних для організації гідроакустичного придушення;

визначення рівня розвитку гідроакустичної техніки, виявлення профілю ВПО та напрямів виконаних у прибережних районах робіт;

визначення гідролокаційних характеристик ПЧ, НК, мінно-торпедного озброєння;

перехоплення інформації, що передають каналами гідроакустичного зв'язку;

картографування рельєфу дна на підходах до узбережжя, проток і фарватерів, військово-морських баз, а також виявлення місць установлення та елементів конструкцій підводних стаціонарних споруд;

виявлення дислокації й маршрутів переміщення об'єктів ВМС за їхніми шумовими полями та сигналами активних ГАЗ;

виявлення підводних стартів ракет і торпед, визначення їхніх місць, глибини та кількості.

У гідролокаторах і шумопеленгаторах приймання корисних сигналів відбувається на фоні гідроакустичних перешкод різного походження.

Крім того, під час роботи гідроакустичної апаратури наявні складні взаємозв'язки між апаратурою, середовищем, у якому поширюється сигнал, і об'єктом розвідки. Саме ці взаємозв'язки визначають дальність дії апаратури в реальних умовах.

Основними характеристиками апаратури ГАР є такі:

робоча частота;

акустична потужність;

ширина ДС акустичної антени;

діапазон робочих частот.

Сутність перелічених характеристик не відрізняється від відповідних характеристик засобів РЛС.

У процесі оцінювання можливостей засобів ГАР важливу роль відіграють такі *просторово-часові параметри середовища поширення:*

розподіл температури й солоності води;

гідростатичний тиск;

відбивні властивості морської поверхні та дна.

Крім того, на дальність дії апаратури ГАР впливають:

відбивна здатність цілі (сила цілі);

рівень створюваного об'єктом шумового випромінювання;

взаємне розташування апаратури розвідки й цілі.

Велику, а в деяких випадках і вирішальну роль відіграє *рівень акустичних перешкод на вході* приймального пристрою.

Урахування всіх цих чинників і параметрів є необхідним для оцінювання можливості виявлення підводних об'єктів.

5.1.2. Акустичні хвилі в морському середовищі

Густина рідин і твердих тіл надзвичайно мало змінюється в разі зміни тиску. Для вирішення багатьох завдань їх можна вважати нестисненими, проте незначні зміни густини, що виникають у разі зміни тиску, відіграють важливу роль в акустиці. Внутрішні сили, що чинять опір зміні

густини, є *пружними*; під час зняття тиску вони приводять тіло в первісний стан.

Рідини мають тільки сили об'ємної пружності, а у *твердому тілі*, крім того, можуть бути сили зсувної пружності.

У *рідині й газах* через відсутність зсувної пружності можуть порушуватися лише **поздовжні хвилі**.

У *твердому тілі* виникають, крім того, ще й **поперечні хвилі**, які поширюються з меншою швидкістю, ніж поздовжні, та швидко згасають.

Змінну частину тиску, що виникає в середовищі під час проходження звукової хвилі, називають **звуковим тиском** P . Це одна з головних величин, що характеризують звукове поле. Одиницею акустичного тиску в системі СІ є паскаль (Па) – тиск, що викликається силою в 1 Н, яка діє на площу 1 м².

Швидкість V , із якою переміщуються частинки середовища щодо свого положення рівноваги під час проходження через неї звукової хвилі, називають **коливальною**. У плоскій біжучій звуковій хвилі:

$$P = V\rho_1c, \quad (5.1)$$

де ρ_1 – густина середовища.

Значення V завжди є набагато меншим за швидкість звукової хвилі c . У поздовжньої хвилі напрямки V і c збігаються.

Залежність між акустичною потужністю W і звуковим тиском має такий вигляд:

$$W = p^2A / 2\rho c, \quad (5.2)$$

де p – значення амплітуди звукового тиску;

A – площа хвильової поверхні, через яку перебігає звукова енергія;

добуток ρc називають **акустичним або хвильовим опором середовища**.

Одиниця потужності в системі СІ – ват (Вт). Для води він дорівнює $1,5 \cdot 10^5$ г/(см²·с).

Інтенсивністю (силою) звуку I називають середню за часом звукову енергію, що переноситься хвилею через одиничну площу, перпендикулярну до напрямку поширення, за одиницю часу.

Точний розрахунок акустичних полів в океані може бути визначено методами *хвильової акустики*. Однак вони, зазвичай, є дуже громіздкими, а недостатність відомостей про всі характеристики середовища зводить нанівець точність хвильових методів.

Багато завдань підводної акустики можна вирішувати, використовуючи *наближені методи*. Найважливішим наближенням є *променевий метод (наближення геометричної акустики)*. Його застосовують, коли розміри неоднорідностей або нерівностей є набагато більшими за довжину хвилі, тобто на довжині хвилі не відбувається помітних змін характеристик середовища (швидкості звуку, густини тощо).

Уведемо поняття логарифмічної шкали рівнів – децибелів (дБ). Такий масштаб часто використовують в акустиці. Це обумовлено тим, що чутливість людського вуха має логарифмічну характеристику, причина останнього криється в досить широкому діапазоні рівнів тиску, що впливають на орган слуху людини.

Логарифмічна характеристика підвищує чутливість вуха за низьких рівнів звукового тиску та знижує її за високих. Логарифмічна шкала зберігає лінійність щодо збільшення за будь якої абсолютної величини.

Прийнято, що величина I_2 , пов'язана з енергією процесу (наприклад, енергія, потужність, інтенсивність тощо), є більшою (меншою) за іншу аналогічну величину I_1 на N дБ, якщо $N = 10 \lg(I_2 / I_1)$. Для акустики має місце такий зв'язок тисків p_1 і p_2 : $N = 20 \lg(p_2 / p_1)$. У децибелах відношення тисків або інтенсивностей для двох процесів позначають однією цифрою. Якщо один тиск перевищує інший у 10 разів, то $N = 20 \lg 10 = 20$ дБ. Відношення їхніх інтенсивностей буде вже 100.

Потрібно пам'ятати, що децибели – це величина відносна, тому потрібно знати щодо якої величини дано рівень у децибелах. Наприклад, якщо відомо, що рівень сигналу 30 дБ щодо 1 Па, то сигнал дорівнює 30 Па, а якщо 30 дБ щодо 1 Вт, то потужність дорівнює 10^3 Вт.

5.1.2.1. Швидкість звуку в морському середовищі

Нині використовують два основні методи опису акустичного поля: *нормальних хвиль* і *наближені*, засновані на уявленнях променевої акустики. Найбільш точний опис процесу формування акустичного поля може бути визначено методами *хвильової акустики*. Вони ґрунтуються на використанні фундаментальних рівнянь гідродинаміки, теорії пружності тощо.

Швидкість звуку є найважливішою акустичною характеристикою океанського середовища. Поле швидкості звуку є параметром визначальним у *формуванні акустичного поля в океані*. Оскільки вертикальні зміни швидкості звуку на кілька порядків перевищують горизонтальні, здебільшого можна вважати, що водне середовище в океані є для акустичних хвиль горизонтально шаруватим середовищем, тобто воно є анізотропним по вертикалі та ізотропним по азимуту.

Швидкість акустичних хвиль у морському середовищі залежить переважно від трьох параметрів: *середньої температури, солоності, гідростатичного тиску*. Інші параметри також можуть впливати на швидкість звуку, наприклад, розчинені у воді гази, суспензії та ін. Однак перші три параметри є визначальними.

Швидкість звуку в океані близька до 1 500 м/с. Найбільш помітно вона змінюється, залежно від температури. Урахувати цей вплив важко, оскільки температура верхніх шарів води в океані залежить не тільки від хвилювання океану, течій, пори року, але й від часу доби. На великій глибині температура змінюється мало і вона є сталою протягом усього року.

У воді швидкість звуку змінюється від 1 420 до 1 520 м/с. Ці зміни призводять до помилок у визначенні дистанції до цілі.

5.1.2.2. Загасання звуку

У міру віддалення акустичної хвилі від джерела рівень звукового тиску поступово падає. Ослаблення звуку з відстанню називають **загасанням**. Загасання звуку визначено декількома причинами:

воно пов'язано з кутовою розбіжністю звукового променя в міру віддалення від джерела випромінювання;

викликано його розсіюванням на неоднорідностях середовища й нерівностях і неоднорідностях її меж – поверхні океану та його дна;

обумовлено поглинанням, тобто переходом частини енергії в тепло. Основні втрати у воді обумовлено зсувною й об'ємною в'язкістю.

5.1.2.3. Відбивання та заломлення звукової хвилі на межі розподілу двох середовищ

На поширення акустичних хвиль у морському середовищі особливо впливає різниця температур за глибиною, яка веде до *нерівномірності розподілу швидкості звуку*. Середовища з нерівномірним розподілом

швидкості звуку за глибиною можна умовно розподілити на горизонтальні шари з різною швидкістю, однаковою в межах шару. Отже, виникають якби межі або поверхні, що відокремлюють одне середовище від іншого. Зустрічаючи таку поверхню, звукова хвиля змінює напрямок поширення. Частина енергії хвилі переходить в інше середовище й через нову швидкість звуку в цьому середовищі змінює свій первісний напрямок, а частина енергії відбивається від поверхні розподілу та поширюється в колишньому середовищі, але за новим напрямком. Отже, з однієї хвилі, що падає, або прямої на поверхні розподілу двох середовищ утворюються *відбита хвиля*, яка поширюється в колишньому середовищі, і *заломлена хвиля*, яка поширюється в новому середовищі (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Відбивання й заломлення звукової хвилі на межі розподілу двох середовищ

Акустичний опір води майже в 5 000 разів більший за акустичний опір повітря, тому звук із води в повітря і навпаки практично не проникає.

Чим більше різняться значення акустичних опорів двох середовищ, тим більшою є різниця між енергією відбитої та заломленої хвиль α .

5.1.2.4. Реверберація в океані

Відомо, що ехо – це відбивання звукової хвилі від поверхні розподілу двох середовищ, що сприймає спостерігач. Коли звук відбивається від декількох поверхонь, які відбивають і розміщені на різних відстанях, чують багаторазове ехо. Якщо час між окремими відбиваннями менший

за 0,1 с, замість окремих ехо чують тривале безперервне звучання. Явище безперервного тривалого, яке слабшає за силою, звучання, що є результатом багаторазових відбивань від перешкод навколишнього простору, прийнято називати *реверберацією*.

Під час поширення звуку в океані відбувається *часткове розсіювання акустичних хвиль*, що викликається нерівностями поверхні води та дна й різними неоднорідностями в самому середовищі. Особливість реальної реверберації – її *флюктуаційний характер*, обумовлений додаванням відбитих сигналів від великої кількості розсіювачів.

Оскільки *реверберація маскує корисний сигнал*, її вважають одним із видів гідроакустичних перешкод.

5.1.2.5. Рефракція звуку

Одним із найважливіших наслідків зміни швидкості звуку є рефракція звукових променів, яка істотно впливає на дальність дії гідроакустичних приладів. *Рефракцією* називають викривлення звукових променів, що проходять через шари з різними швидкостями поширення звуку.

Великий вплив на поширення звуку в океані має також так званий шар температурного стрибка. У літні місяці море дістає тепло від Сонця та атмосфери й тому верхні шари води будуть більш нагрітими, ніж нижні. Сонячна енергія проникає у воду неглибоко, і за спокійного стану океану через повільний процес теплопровідності утворюється значна різниця температури у верхніх і нижніх шарах.

У вітряну погоду верхній шар води може стати майже ізотермічним і нижче будуть спостерігати більш різкий перепад температури. У шарі стрибка градієнт температури, тобто зміна її на одиницю глибини, може досягати декількох градусів на 1 м. У зв'язку із цим швидкість звуку також різко зменшиться.

Найбільша дальність дії гідроакустичних приладів у гідрологічних умовах буває за позитивної рефракції. Цим пояснено, тим що в зимову пору року дальність дії гідроакустичних засобів у кілька разів є більшою за дальності, які спостерігають улітку.

5.1.2.6. Підводний звуковий канал

Серед різноманітності різних випадків розподілу швидкості звуку за глибиною необхідно особливо зазначити явище звукового каналу.

Підводним звуковим каналом прийнято називати ділянку глибин океану або океану, у якій звукові промені зазнають шляхом рефракції повного багаторазового внутрішнього відбивання від її меж. Звуковий канал утворюється в умовах, якщо від'ємний градієнт швидкості звуку у верхніх шарах переходить у додатний градієнт у нижніх, тобто якщо на певній глибині є мінімум швидкості звуку.

Зазвичай вісь приповерхневого звукового каналу проходить на глибині 40 – 80 м. Цей канал є сезонним явищем: він виникає навесні та зникає восени; його поява зазвичай залежить від формування шару температурного стрибка.

5.1.3. Гідроакустичні засоби розвідки та спостереження

Гідроакустичні засоби розвідки та спостереження вирішують завдання виявлення, визначення координат та класифікації різних надводних і підводних об'єктів.

За принципом використання енергії засоби розвідки та спостереження розподіляють на **активні** (гідролокатори) і **пасивні** (шумопеленгатори). Своєю чергою, кожен із них охоплює численні типи апаратури, що відрізняються принципами дії й побудови, можливостями та технічними параметрами.

У **гідролокаторі** для виявлення та визначення координат цілі використовують опромінення цілі акустичною енергією та приймання ехосигналу, що містить частину випромінюваної енергії, відбитої від її поверхні.

У **шумопеленгаторі** як корисний сигнал використовують шуми, ненавмисно створювані ціллю у процесі її функціонування.

Як у гідролокаторах, так і шумопеленгаторах приймання корисних сигналів відбувається на фоні інтенсивних гідроакустичних перешкод різного походження.

Важливу роль у процесі ведення розвідки відіграють стан середовища, що розділяє об'єкт спостереження та засіб розвідки; розподіл температури й солоності води, гідростатичний тиск, коефіцієнт просторового загасання, властивості морської поверхні та дна, що відбивають, тощо.

Застосування в гідролокаторах *імпульсних сигналів* із певною амплітудою та тривалістю забезпечує досить високу роздільну здатність або дальність, або частотою доплерівського зрушення, але не за обома цими параметрами одночасно. Для досягнення високої *роздільної здатності*

за дальністю використовують короткі імпульси, за доплерівською частотою – довгі. Останні будуть більш придатними й під час роботи апаратури в умовах сильної шумової перешкоди.

Для оптимізації використання гідролокатора у змінюваних реальних умовах тривалість і форму випромінюваних імпульсів може в деяких пристроях змінювати оператор.

Великий інтерес становлять *імпульсні сигнали з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ)*, у яких миттєве значення частоти заповнення лінійно змінюється в часі. Застосування таких сигналів дає гарні результати в умовах сильної ревербераційної перешкоди та за малих значень доплерівського зрушення.

Сигнали із *псевдовипадковою модуляцією* мають гарну роздільну здатність одночасно за дальністю й доплерівським зсувом частот, що дозволяє успішно використовувати їх в умовах багатопроменевості поширення сигналу та сильної реверберації.

Безперервне випромінювання *сигналів із частотною модуляцією* має істотні переваги перед імпульсним. Однак гідролокатори з безперервним випромінюванням і ЧМ-сигналом мають обмежену, порівняно з імпульсними дальність дії. Тому безперервне випромінювання застосовують, головним чином, у спеціальній апаратурі, зокрема, у гідролокаторах для глибоководних апаратів або для водолазів та аквалангістів.

Для підтримання постійного рівня хибних тривог в умовах великого динамічного діапазону сигналів у гідролокаторах можна використовувати приймальний тракт із логарифмічною амплітудної характеристикою. Такий тракт не перевантажено перешкодами, він згладжує їхні флуктуації.

Для нормування амплітуди сигналів у приймальних трактах гідролокаторів і шумопеленгаторів широко застосовують їхнє двостороннє обмеження. Застосування обмеження спрощує погодження гідроакустичної апаратури з ЕОМ та іншими пристроями, заснованими на цифровій техніці. Після регулювань і нормування сигналу починається його оброблення, сутність якого полягає у виділенні корисного сигналу з маскувальних перешкод різного походження. Найбільші труднощі викликає виділення сигналу на фоні випадкових перешкод, спектр частот яких перебиває спектр частот сигналу. У цьому разі вирішальну роль відіграють статистичні властивості сигналів.

5.1.3.1. *Різновиди гідролокаційних станцій (ГЛС)*

Основні різновиди ГЛС є такими:

ГЛС крокового огляду;

ГЛС колового огляду з усеспрямованим випромінюванням і швидко сканувальною діаграмою спрямованості (ДС) антени під час приймання;

ГЛС із безперервним випромінюванням і частотною модуляцією сигналу;

ГЛС секторного огляду зі швидко сканувальною діаграмою спрямованості антени під час приймання.

5.1.3.2. *Основні показники та параметри ГЛС*

Показники, що характеризують можливість ГЛС вирішувати завдання спостереження за певними об'єктами, називають **тактичними**. Найважливішими з них є такі:

максимальна дальність виявлення цілі;

мінімальна дальність дії або радіус мертвої зони;

роздільна здатність;

точність вимірювання координат;

перешкодостійкість;

надійність;

ступінь автоматизації оброблення та знімання здобутої ГЛЗ інформації.

До *технічних параметрів* ГЛС належать характеристики, що забезпечують досягнення необхідних тактичних показників станції.

Найважливішими з них є такі:

робоча частота;

випромінювана акустична потужність;

ширина ДС у горизонтальній і вертикальній площинах і коефіцієнт осьової концентрації антени під час випромінювання та приймання;

енергетичний потенціал;

тривалість і форма випромінюваних імпульсів;

коефіцієнт посилення приймального тракту та смуга пропускання.

Експлуатаційні характеристики ГЛС відображають, головним чином, зручність роботи з апаратурою, наочність відображення інформації, необхідні заходи з поточного догляду за ГЛС, ремонтпридатність, наявність у складі станції допоміжних пристроїв – променеграфів, тренажерів,

систем технічної діагностики тощо. Характеристики та параметри ГЛС наводять у поданій до неї технічній документації.

5.1.4. Принципи побудови шумопеленгатора

Шумопеленгатори призначено для виявлення та прослуховування шумових сигналів різного походження та визначення напрямку на їхнє джерело.

Оброблення сигналів під час шумопеленгування істотно відрізняється від оброблення сигналів під час гідролокації. Під час шумопеленгування на вхід системи надходять вибірки з навколишнього простору, що мають *імовірнісний характер*. У шумопеленгаторах зазвичай використовують групові акустичні антени, що складаються з великої кількості приймачів, які утворюють площинну або просторову ґратку різної конфігурації.

Оброблення сигналів починається з їхньої просторової селекції, що полягає у формуванні ДС антени та орієнтування її осі щодо напрямку на ціль.

На виході приймального тракту поміщають пороговий пристрій, у якому порівнюють поточний вихідний ефект зі встановленим рівнем. У разі перевищення вихідного ефекту над пороговим рівнем роблять висновок про виявлення цілі. Поріг спрацьовування вибирає оператор з урахуванням однієї з таких умов:

імовірність правильного виявлення сигналу має бути максимальною, а ймовірність помилкових тривог – такою, що не перевищує заданого значення (критерій Неймана – Пірсона);

імовірність правильного виявлення сигналу має бути максимальною, а ймовірність помилкових тривог – мінімальною (критерій ідеального спостерігача).

Функції порогового пристрою може виконувати спостерігач, їх може бути покладено на ЕОМ. Конкретна реалізація загальних принципів побудови шумопеленгатора може бути різною. Так, у деяких сучасних шумопеленгаторах застосовують сумарно-різницеве просторове оброблення сигналів, які надходять від двох груп приймачів.

Структурні схеми деяких різновидів шумопеленгаторів (ШП) такі: шумопеленгатори зі сканувальною ДС та автоматичним супроводженням цілі (АСЦ);

ШП із віялом статично сформованих пелюсток ДС.

Основними *тактичними показниками* ШП є такі:

максимальна дальність виявлення, яка змінюється в широких межах і становить для сучасних станцій від декількох одиниць до сотень кілометрів;

точність пеленгування становить від десятих часток до $1 - 2^\circ$;

роздільна здатність за напрямком;

стійкість;

надійність;

ступінь автоматизації роботи станції.

Основні *технічні параметри* є такі:

діапазон робочих частот;

ширина ДС і коефіцієнт осьової концентрації антени;

смуги пропускання діапазонів;

коефіцієнт посилення приймального тракту.

5.1.4.1. Гідроакустичні антени

Гідроакустичної антеною називають пристрій, що забезпечує просторово-вибірче випромінювання або приймання звуку у водному середовищі. Гідроакустична антена зазвичай складається з електроакустичних перетворювачів (елементів антени), акустичних екранів, носійної конструкції та ліній електрокомунікацій.

Гідроакустичні антени можна класифікувати за рядом ознак. За способом створення просторової вибірковості антени можна розподілити на *інтерференційні (безперервні й дискретні)*, *ті які фокусують, рупорні та параметричні*. Антени також можуть бути випромінювальними, приймальними або оборотними, працювати в одному або декількох режимах.

За способом оброблення сигналів розрізняють антени *адитивні, мультиплікативні*, ті що самофокусуються, що адаптуються, із синтезованою апертурою та ін.

5.1.4.2. Гідроакустичні перетворювачі

Гідроакустичний перетворювач – це неодмінний елемент гідроакустичної антени. Він становить коливальну систему, призначену для випромінювання та приймання акустичних сигналів у водному середовищі.

За призначенням їх розподіляють на випромінювачі, приймачі та оборотні перетворювачі.

За принципом перетворення енергії розрізняють п'єзоелектричні, магнітострикційні, електродинамічні, електромагнітні та електростатичні.

За структурою коливальної системи перетворювачі розподіляють на стрижневі, пластинчасті, циліндричні, сферичні.

За конструктивним виконанням розподіляють на силові та компенсовані.

5.1.5. Принципи здобування інформації в гідроакустичних інформаційних системах

5.1.5.1. Способи огляду простору

У процесі гідролокації та шумопеленгування застосовують різні способи огляду простору, які можна звести до таких трьох основних різновидів:

- 1) кроковий;
- 2) коловий з усеспрямованим випромінюванням і скануванням під час приймання;
- 3) коловий зі спрямованим випромінюванням і статистичною ДС під час приймання.

5.1.5.2. Способи вимірювання дистанції до підводних цілей

Системи визначення координат підводних об'єктів можуть бути одно- й багатопозиційними.

В *однопозиційних* системах для визначення координат цілей використовують єдину приймальну систему.

У *багатопозиційних* антени рознесено у просторі на відстані, що перевищують просторовий інтервал кореляції сигналу. Збільшення кількості елементів у багатопозиційних системах значно сприяє розширенню можливостей визначення координат та елементів руху багатьох підводних цілей.

5.1.5.3. Способи визначення кутових координат підводних цілей

Визначення кутових координат підводних цілей ґрунтується в гідроакустиці на використанні спрямованих властивостей приймальних антен.

В акустиці методи пеленгування часто називають за параметром, вихідний сигнал антени якого відіграє основну роль.

Найбільш широко застосовують у гідроакустичних засобах амплітудний (максимальний), фазовий, фазово-амплітудний і кореляційний методи.

5.1.5.4. Визначення місце розташування підводних об'єктів у багатопозиційних системах

Зазвичай, багатопозиційні системи застосовують, щоб забезпечити огляд значних за площею районів із використанням лише пасивних засобів. Однак зниження рівнів акустичних випромінювань сучасних підводних об'єктів зумовило також розвиток *методів акустичного підсвічування* слабовипромінювальних цілей.

Багатопозиційні системи містять, зазвичай, безліч однопозиційних, що дозволяють оцінити місце розташування джерела початкового або вторинного випромінювання з високою точністю.

Тріангуляційний метод засновано на одночасній або різнотривалій пеленгації об'єкта із двох або більше точок простору. Місце розташування джерела відповідає точці перетину двох або декількох прямих, які є лініями положення (пеленгами на джерело).

Кутомірні методи засновано на вимірюванні напрямку на джерело в різні моменти часу й акустичного тиску в різних точках.

Різницево-далекомірні методи засновано на вимірюванні часу затримки приходу сигналів на рознесені у просторі приймачі. У різних варіантах метод може бути використано як у пасивних системах виявлення, так і системах акустичного підсвічування.

Доплерівський метод застосовують для оцінювання місця розташування тільки рухомих цілей. Його засновано на залежності частоти випромінюваних або відбитих рухомою ціллю сигналів від вектора швидкості цілі.

5.2. Фізичні основи захисту від акустичної розвідки

5.2.1. Основні поняття

Під **акустичною розвідкою (АР)** розуміють здобування інформації шляхом приймання й аналізу акустичних сигналів інфразвукового, звукового, ультразвукового діапазонів, що поширюються в *повітряному середовищі* від об'єктів розвідки.

Акустична розвідка забезпечує здобування інформації, що міститься безпосередньо в усному або відтворюваному мовленні (акустична мовна розвідка), а також у параметрах акустичних сигналів, супутній роботі озброєння та військової техніки, механічних пристроїв оргтехніки та інших технічних систем (акустична сигнальна розвідка).

АР вирішує такі *завдання*:

дистанційне перехоплення смислової мовної інформації;

визначення технічних і тактичних характеристик озброєння (О) та військової техніки (ВТ) (оцінювання потужності вибухів боєприпасів і вибухових речовин під час випробувань, визначення параметрів авіаційних і ракетних двигунів під час стендових випробувань тощо);

визначення характеру та спрямованості робіт на військово-промислових об'єктах;

визначення шумових сигнатур О та ВТ.

Для вирішення зазначених завдань АР використовує портативну апаратуру приймання й реєстрації акустичних сигналів і стаціонарну апаратуру їхнього оброблення й аналізу.

Апаратуру АР *засновано на* використанні властивостей середовища передавати звукові коливання.

Можливими *каналами витоку інформації* можуть бути:

повітряне середовище, через яке поширюються як мовні сигнали, що виникають під час ведення розмов, так і шумове акустичне випромінювання, що створюється двигунами, що працюють, військовою технікою, озброєнням, вибухами тощо;

вібраційні канали, у яких середовищем поширення акустичних сигналів є конструкції будівель, споруд (стіни, стелі, підлоги), труби водопостачання, опалення, каналізація та ін.;

канали електроакустичного типу, пов'язані з перетворенням акустичних сигналів в електричних елементах різних допоміжних технічних засобів і систем (ДТЗС), наприклад, електромагніти вторинних електрогенераторів, дзвінкові ланцюги телефонних апаратів, трансляційні динаміки;

канали оптико-акустичного типу, у яких за допомогою зондувального лазерного променя здійснюють знімання інформації з вібрувальних в акустичному полі тонких відбивних поверхонь (шибок, картин, дзеркал);

канали параметричного типу, що виникають у разі впливу акустичного інформаційного поля на всі елементи високочастотних генераторів основних технічних засобів передавання, оброблення та зберігання інформації (ТЗПІ) і ДТЗС.

Для перехоплення мовної інформації під час поширення акустичних сигналів через повітряне середовище використовують *мініатюрні високочутливі мікрофони*, які можна об'єднувати з портативними звукозаписними пристроями (диктофонами) або мініатюрними спеціальними передавачами.

Автономні пристрої, у яких конструкційно об'єднано мініатюрні мікрофони й передавачі, називають **закладними пристроями перехоплення мовної інформації**, або **акустичними закладками**.

Перехоплену закладними пристроями мовну інформацію можна передавати радіоканалом, оптичним каналом, мережею змінного струму, з'єднувальними лініями допоміжних технічних засобів і систем, сторонніми провідниками (трубами водопостачання та каналізації, металоконструкціями). Інформацію, передану закладними пристроями, приймають, зазвичай, спеціальними пристроями.

Використання портативних диктофонів та акустичних закладок потребує проникнення на контрольований об'єкт (у приміщення). У тому разі, коли це не вдається, для перехоплення мовної інформації використовують **спрямовані мікрофони**.

Для перехоплення акустичних сигналів із вібраційного каналу витоку використовують **контактні мікрофони**.

Контактні мікрофони, з'єднані з електронним підсилювачем, називають **електронними стетоскопами**.

Вібраційним каналом можливе також перехоплення інформації з використанням закладних пристроїв. Для передавання інформації в цьому разі використовують радіоканал, тому такі пристрої часто називають **радіостетоскопами**.

Можливе використання закладних пристроїв з передачею інформації **оптичним**, а також **ультразвуковим каналами** (металоконструкціями будинків).

У каналах електроакустичного типу перехоплення акустичних інформаційних сигналів можливе шляхом зміни параметрів елементів допоміжних технічних засобів і систем (ДТЗС) під впливом акустичного поля як результат **мікрофонного ефекту**, а також шляхом **високочастотного нав'язування**.

Мікрофонним називають ефект перетворення акустичних коливань на електричні. Акустичні коливання в цьому каналі витоку інформації перехоплюють шляхом безпосереднього підключення до з'єднувальних

ліній ДТЗС, які мають мікрофонний ефект, та спеціальних високочутливих низькочастотних підсилювачів.

Технічний канал витоку інформації шляхом **високочастотного на-в'язування** може бути використано в результаті несанкціонованого контактного введення струмів високої частоти від відповідного генератора в лінію, що має функціональні зв'язки з нелінійними або параметричними елементами ДТЗС, на яких *відбувається модуляція високочастотного сигналу інформаційним*. Інформаційний сигнал у таких елементах виникає, унаслідок нелінійного електроакустичного перетворення акустичних сигналів на електричні.

Під час опромінення променем лазера вібрвальних в акустичному полі тонких відбивних поверхонь (скла вікон, картин, дзеркал тощо) утворюється **оптико-акустичний канал витоку акустичної інформації**. Відбите від подібної поверхні лазерне випромінювання виявляється промодульованим за амплітудою та фазою, відповідно до вібрацій поверхні. Частина відбитого випромінювання перехоплюється оптичною системою приймача й перетворюється на електричні сигнали, після демодуляції яких виділяється мовна інформація.

Лазерний випромінювач і приймач може бути встановлено в одному місці або рознесено.

Для перехоплення інформації із цього каналу використовують *лазерно-акустичні локаційні системи*, що працюють у близькому інфрачервоному діапазоні хвиль.

У **каналі параметричного типу** в результаті впливу акустичного поля змінюється тиск на всі елементи високочастотних генераторів технічних засобів передавання, оброблення та зберігання інформації та ДТЗС. Водночас незначно змінюється взаємне розташування елементів схем, проводів у котушках індуктивності, дроселів, що може привести до зміни параметрів високочастотного сигналу, наприклад, до частотної модуляції його інформаційним сигналом. Параметричний канал витоку інформації може бути реалізовано і шляхом опромінення високочастотним зондувальним сигналом приміщення, де встановлено напівактивні закладні пристрої, що мають елементи, деякі параметри яких (наприклад, добротність і резонансна частота об'ємного резонатора) змінюються за законом зміни акустичного (мовного) сигналу.

Для перехоплення інформації із цього каналу, крім закладного пристрою, необхідно мати спеціальний передавач зі спрямованим випромінюванням і приймач.

Для приймання, реєстрації та аналізу акустичних сигналів, властивих промисловим і військово-промисловим об'єктам, а також різним видам бойової техніки, застосовують звуко- та вібровимірювальні прилади.

Дальність дії акустичних приладів лежить у межах від декількох десятків метрів до декількох кілометрів і залежить від потужності акустичних сигналів та стану середовища поширення.

Як **акустичні розвідувальні прилади** зазвичай використовують такі: вимірювальні мікрофони, що перебивають інфразвуковий, звуковий та ультразвуковий діапазони;

прецизійні шумоміри, що дозволяють із великою точністю вимірювати рівні шумів, звуку та вібрацій у широкому діапазоні частот (у комплекті з аналізаторами спектра акустичних сигналів);

геофонні датчики, які вимірюють сейсмічні хвилі;

частотні аналізатори та спектрометри, що забезпечують визначення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) джерел акустичних шумів.

Прийняті акустичні сигнали можуть обробляти й аналізувати за допомогою ЕОМ.

Можливості засобів АР значною мірою залежать від середовища поширення та рівня фонового акустичного шуму.

5.2.2. Акустичні хвилі в повітряному середовищі

Акустична хвиля, або звук, – це механічні коливання, що поширюються в повітрі або структурних конструкціях і сприймаються органами слуху чи технічними засобами.

Джерелами акустичних сигналів можуть бути люди, які розмовляють, механізми, прилади, пристрої та засоби, які відтворюють раніше записані звукові сигнали.

5.2.2.1. Основні характеристики акустичних хвиль

Звукові хвилі, які поширюються в середовищі характеризуються:

звуковим тиском;

інтенсивністю;

гучністю;
коефіцієнтами відбивання, заломлення й поглинання;
швидкістю поширення;
рефракцією;
дифракцією;
інтерференцією та реверберацією.

Звуковий тиск – це сила, що діє на одиницю площі, яку вимірюють у паскалях (Па). Звуковий тиск у повітрі змінюється від 10^{-5} Па поблизу порога чутності до 10^3 Па за найгучніших звуків.

Іноді для характеристики звуку застосовують рівень звукового тиску в децибелах. Це є відношення цього звукового тиску P до порогового $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па: $N = 20 \lg (P / P_0)$.

Середнє за часом значення потужності звуку, належне до одиниці площі, називають **інтенсивністю**.

Інтенсивність звуку оцінюють рівнем інтенсивності за шкалою децибел: $N = 10 \lg (I / I_0)$, де I – інтенсивність цього звуку, $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м².

З інтенсивністю звуку пов'язано **гучність** – величину, що характеризує слухове відчуття від цього звуку. Гучність звуку складним чином залежить від звукового тиску (інтенсивності), а також рівня акустичного шуму та фонових перешкод.

У разі незмінної частоти та форми коливань гучність звуку зростає з підвищенням інтенсивності (звукового тиску).

За однакового звукового тиску гучність звуку гармонічних коливань різної частоти є неоднаковою, тобто на різних частотах однаково гучність можуть мати звуки різної інтенсивності.

Значення **швидкості поширення звуку в деяких типових середовищах** становлять у:

повітрі 331,5 – 344 м/с;
металі 4 800 – 5 160 м/с;
склі 3 500 – 5 300 м/с;
дереві 4 000 – 5 000 м/с.

З огляду на те, що швидкість поширення звуку в повітрі (331,5 – 344 м/с), довжина чутних у повітрі звукових хвиль коливається від 1,5 см до 15 м.

Рефракція звуку – це викривлення напрямку поширення хвиль у неоднорідному середовищі. Рефракцію звуку в атмосфері обумовлено просторовими змінами температури повітря, швидкості та напрямку вітру.

Дифракція звуку – це відхилення поширення звуку від законів геометричної акустики, пов'язане з неоднорідністю середовища, у якому рухається звукова хвиля. Унаслідок дифракції, звук може огинати зустрічні перешкоди, потрапляти в ділянку геометричної тіні, концентруватися на отворах тощо.

Інтерференція звуку – це складання у просторі декількох хвиль, за якого в різних точках виникає стале в часі посилення або ослаблення амплітуди результативної хвилі.

Шляхом багаторазових перевідбивань акустичної хвилі в замкненому просторі виникає післязвучання – **реверберація**. Значення реверберації оцінюють часом після вимкнення джерела звуку, протягом якого енергія звуку знижується на 60 дБ.

Істотно впливають на дальність і якість приймання акустичних сигналів **фонові шуми та перешкоди**.

Акустичні шуми й перешкоди викликають численними джерелами – автомобільним транспортом, вітром, технічними засобами, розмовами у приміщеннях тощо.

Рівні шумів змінюються протягом доби, днів тижня, вони залежать від погодних умов.

5.2.2.2. Загасання повітряної акустичної хвилі

Загасання звуку – це зниження інтенсивності звукової хвилі (а отже, й амплітуди) у міру її поширення. Воно залежить від різних причин:

розбіжності хвилі, у результаті якої знижується інтенсивність звуку;

розсіювання звуку на перешкодах у середовищі та її неоднорідностях, розміри яких є малими або порівнянними з довжиною хвилі;

поглинання звуку, що відбувається в результаті незворотного переходу енергії звукової хвилі в інші види енергії (переважно в теплову й механічну).

Залежність інтенсивності звукової хвилі від відстані визначають за такою формулою:

$$I(r) = I_0 e^{-\beta r}, \quad (5.3)$$

де I_0 – початкова інтенсивність звуку;

β – лінійний коефіцієнт поглинання звуку в цьому середовищі.

Величина I_0 зростає пропорційно квадрату частоти звуку, тому низькі звуки поширюються далі, ніж високі. Особливо сильно поглинаються ультразвуки.

5.2.2.3. Структурні акустичні хвилі

Поширення звуку в будівлях відбувається часто на досить великі відстані, завдяки проходженню в різних структурних середовищах. У результаті досить часто може виникнути досить небезпечний канал витоку акустичної інформації – **канал структурного звуку**.

Під **структурним звуком** розуміють механічні коливання у твердому тілі із частотою від 16 до 20 кГц.

Механічні коливання стін, перекриттів, трубопроводів, що виникають в одному місці або на великій площі, передаються на значні відстані, майже не затухаючи.

Подібні коливання добре перехоплювати такими приймальними пристроями, як стетоскопи.

5.3. Загальні відомості про закладні пристрої та пристрої перехоплення мовної інформації

5.3.1. Загальні відомості

Є велика кількість типів закладних пристроїв (ЗП), що відрізняються принципом функціонування, способом передавання інформації, дальністю дії, розмірами та зовнішнім оформленням.

Усі закладні пристрої можна класифікувати за такими ознаками:

- способом передавання інформації;
- способом сприйняття інформації (типом датчика);
- використовуваним джерелом живлення;
- способом управління;
- способом кодування інформації;
- видом виконання;
- місцем використання;
- місцем установлення.

Залежно від каналу передавання інформації, розрізняють такі типи ЗП (рис. 5.2):

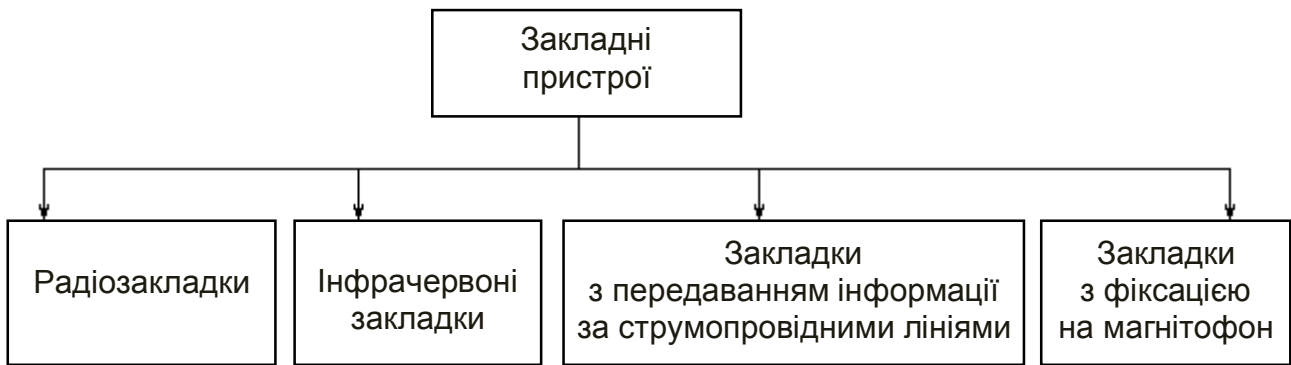


Рис. 5.2. Класифікація закладних пристроїв, залежно від каналу передавання інформації

У радіозакладках для передавання інформації використовують електромагнітні хвилі радіодіапазону.

В інфрачервоних закладках для передавання інформації використовують електромагнітні хвилі інфрачервоного діапазону. Використання лазерних джерел випромінювання забезпечує його високу спрямованість (вузький світловий промінь), що створює великі труднощі виявлення подібного випромінювання.

Закладки з передаванням інформації електропровідними лініями використовують властивість електричних сигналів поширюватися на значні відстані провідниками. Такі ЗП мають істотні переваги: високою потайністю передавання інформації, великою дальністю дії, відсутністю додаткових джерел живлення.

У разі, якщо немає необхідності у здобуванні оперативної інформації в реальному масштабі часу та є можливість таємного вилучення й заміни касети або магнітної стрічки, закладку можна оснащувати магнітофоном, замість пристрою передавання, одним із розглянутих каналів.

Залежно від способу сприйняття інформації, розрізняють такі три типи ЗП:

- мікрофонного;
- вібраційного;
- із підключенням до комунікаційних ліній.

Принцип дії ЗП мікрофонного типу засновано на перетворенні акустичних атмосферних коливань на електричні сигнали й передавання їх споживачеві одним із перелічених способів.

ЗП вібраційного типу (стетоскопи) перехоплюють акустичні коливання твердих середовищ (вібрації), що виникають, унаслідок тиску атмосферних акустичних хвиль на середовища. Як чутливі елементи в таких

пристроях зазвичай використовують п'єзомікрофони, електронні мікрофони або датчики акселерометричного типу.

ЗП із підключенням до комунікаційних ліній призначено для перехоплення інформації, що циркулює в телефонних або волоконно-оптичних лініях.

Для передавання інформації із ЗП, що підключають, зазвичай використовують радіоканал, а пристрої називають *радіозакладними* або *радіозакладки*.

За способом підключення до телефонних ліній радіозакладки розподіляють на дві групи.

Перша група – *радіозакладки з безпосереднім підключенням*. Такі способи дозволяють досягти досить високого рівня сигналу на вході радіозакладки, а також забезпечити живлення від лінії. Однак закладки з безпосереднім підключенням може бути легко виявлено за змінами параметрів лінії. Цього недоліку значною мірою позбавлено пристрої другої групи – *радіозакладки з індукційним підключенням*. У таких закладках чутливим елементом є спеціальним чином побудована антена, що встановлюють упритул до проводів телефонної лінії.

Закладні пристрої для зняття інформації з *волоконно-оптичних ліній* принципово відрізняються від розглянутих раніше тільки способом зняття інформації. Для цих цілей застосовують спеціальні *пристрої стишення волоконних ліній*, що викликають інтерференційні процеси на поверхні оптичного волокна, які зчитуються фотоприймачем.

За використанням *джерелом живлення* ЗП можна розподілити на два види із:

- власним джерелом;
- живленням від зовнішнього джерела.

За наявності *пристрою управління* ЗП умовно можна розподілити на три групи з:

- безперервним випромінюванням;
- дистанційним управлінням;
- автоматичним увімкненням у разі появи сигналу.

Для підвищення потайності роботи використовують *складні сигнали* (наприклад, шумоподібні або зі псевдовипадковою перебудовою частоти, що несе) і різні способи кодування інформації. Зі способів кодування частіше зустрічають *аналогове скремблювання* мовного сигналу (зазвичай, інверсію спектра), за якого змінюються характеристики мовного сигналу так, що він стає нерозбірливим.

5.3.2. Радіозакладки

У практиці ведення технічної розвідки широко застосовують пристрої з передавання перехопленої інформації радіоканалом, радіозакладними пристроями (РЗП), або радіозакладками. Із технічного погляду закладні пристрої можуть працювати в будь-якому радіодіапазоні. Однак із погляду конструктивних особливостей найбільш використовуваним є діапазон частот 100 – 1 000 мГц.

За принципом формування сигналу РЗП розподіляють на активні, напівактивні та пасивні. Найбільшого поширення набули *активні* РЗП. В основу принципу дії *напівактивних* РЗП покладено комплексне використання зовнішнього спеціально сформованого потужного зондувального сигналу й енергії власного джерела живлення. Водночас енергію власного джерела живлення витрачають тільки на модуляцію прийнятого високочастотного сигналу та його посилення.

Принцип дії *пасивних* РЗП засновано на опроміненні потужним високочастотним сигналом приміщення, у якому встановлено такий закладний пристрій. В останньому під час взаємодії опромінювального електромагнітного поля зі спеціальними елементами закладки (наприклад, чвертьхвильовим вібратором) відбувається утворення вторинних радіохвиль, тобто перевипромінювання електромагнітного поля.

Спеціальний пристрій закладки (наприклад, об'ємний резонатор) *забезпечує амплітудну, фазову або частотну модуляцію* перевідбитого сигналу за законом зміни мовного сигналу.

Перевагою подібних закладок є висока потайність, оскільки виявити їх можна тільки в момент передавання інформації. Відсутність напівпровідникових приладів у таких закладках робить неефективним їхній пошук, навіть із використанням нелінійних локаторів.

Для приймання інформації, переданої з радіозакладок, можна використовувати портативні сканерні приймачі, спеціальні приймальні пристрої, приймачі портативних радіостанцій, побутові радіоприймачі.

5.3.3. Закладні пристрої з передаванням інформації оптичним каналом

Недоліком радіозакладок є можливість виявлення їхніх випромінювань спеціальним приймачем контролю. Із метою усунення цього недоліку, розроблено пристрої, що передають інформацію оптичним каналом

в інфрачервоному, невидимому оком людини діапазоні. Такі закладки іноді називають *інфрачервоними*.

Інфрачервоний передавач перетворює акустичні коливання на світлові, використовуючи *широко-імпульсну модуляцію*. Для приймання інформації, переданої такими закладками, використовують приймачі оптичного випромінювання. Дальність передавання інформації для них становить кількесот метрів. Виявити закладку, що передає інформацію в інфрачервоному діапазоні, можна тільки маючи спеціальний приймач оптичного випромінювання.

5.3.4. Закладні пристрої з передаванням інформації електромережею

Крім радіо- й оптичного каналів для передавання акустичної інформації, використовують *струмопровідні лінії*. Найбільш поширеними є закладки, що використовують із цією метою електричну мережу з напругою 220 В.

Зазвичай, пристрої для підслуховування встановлюють у стандартну розетку або будь-який інший постійно підключений до силової мережі електроприлад (трійник, подовжувач, блок живлення радіотелефону, факс тощо), розташований у приміщенні, у якому зазвичай ведуть переговори.

Чутливість використовуваних у закладках мікрофонів, зазвичай, забезпечує сприйняття людського мовлення на відстані до 10 м.

Для передавання інформації в мережевих закладках зазвичай використовують прості сигнали з вузькосмуговою модуляцією. Однак деякі мережеві закладки використовують сигнали складної форми або псевдовипадкову перебудову носійної частоти.

У мережевих закладках можна застосовувати пристрої дистанційного управління, які передають кодовані сигнали на вмикання (вимикання) передавача закладки також електричною мережею.

Живлення закладки здійснюють від тієї самої мережі 220 В.

Дальність передавання інформації зазвичай перебуває в межах 300 – 1 000 м.

Для приймання інформації від мережевих закладок використовують спеціальні приймачі, які вмикають до силової мережі через розетку.

Крім мережі електроживлення, для передавання інформації можна використовувати лінії систем охоронної та пожежної сигналізації, телефонні

лінії. Водночас можна застосовувати закладки, принцип роботи яких є аналогічним принципу роботи мережевих закладок, а також тим, що передають інформацію безпосередньо в мовному діапазоні.

5.3.5. Телефонні закладки

Телефонними називають закладки, призначені для перехоплення інформації, що передають телефонними лініями зв'язку. Перехоплену інформацію записують на диктофони або передають радіоканалом із використанням мікропередавача.

Телефонні закладки, як і акустичні, можна класифікувати за видом виконання, місцем установлення, джерела живлення, способу передавання інформації й кодування, способу управління тощо.

Телефонні закладки може *бути встановлено* таким способом:

послідовно в розрив одного з телефонних проводів;

паралельно або через індукційний датчик;

у разі гальванічного підключення до лінії (як послідовного, так і паралельного) забезпечено необмежений час роботи закладки.

Телефонні закладки перехоплену інформацію передають здебільшого радіоканалом. Зазвичай як передавальну антену використовують телефонний провід.

У телефонних закладах, як і в акустичних, передану інформацію можна кодувати різними методами. Для приймання інформації від телефонних закладок використовують такі самі засоби, як і від акустичних.

5.3.6. Спрямовані мікрофони

Для перехоплення мовної інформації на відкритій місцевості та у приміщеннях широко використовують мікрофони спрямованої дії. У найбільш загальному вигляді будь-який спрямований мікрофон складається із чутливого елемента (власне мікрофона), що здійснює акустоелектричне перетворення, і деякої системи (акустичної антени), що забезпечує спрямовані властивості комплексу загалом.

Залежно від принципу дії, мікрофони розподіляють на такі типи:

порошкові вугільні;

електродинамічні;

електростатичні (конденсаторні, електретні);

п'єзоелектричні;

електромагнітні.

Принцип дії *порошкового вугільного мікрофона* засновано на зміні під впливом акустичних хвиль електричного опору вугільного порошку, розміщеного між мембраною та нерухомим електродом.

В *електродинамічному мікрофоні* використовують діафрагму з полістирольної плівки або алюмінієвої фольги. Котушка з обмоткою, зроблена з тонкого дроту, жорстко пов'язана з діафрагмою й постійно перебуває в кільцевому проміжку магнітної системи. Під час коливань діафрагми під впливом акустичної хвилі витки котушки перетинають магнітні силові лінії та в обмотці створюється ЕРС, що змінюється за законом діючого акустичного поля.

Конденсаторний мікрофон становить конструкцію, що складається із двох паралельних платівок – електродів, один із яких є масивним, а другий – у вигляді тонкої мембрани. Електроди утворюють конденсатор, ємність якого залежить від площі платівок і відстані між ними. До платівок конденсатора підведено постійну напругу. У разі впливу на мембрану звукових хвиль змінюється відстань між платівками, що викликає зміну ємності конденсатора й перебігу струму через нього. Сила струму змінюється, відповідно до діючого на мембрану акустичного поля.

Дія *п'єзоелектричного мікрофона* ґрунтується на виникненні ЕРС на поверхні платівок із п'єзоматеріалу, механічно пов'язаних із мембраною. Коливання мембрани під тиском акустичної хвилі передаються п'єзоелектричній платівці, на поверхні якої виникають електричні заряди, що відповідають рівню гучності акустичного сигналу.

В *електромагнітному мікрофоні* акустичні хвилі впливають на мембрану, жорстко пов'язану зі сталевим якорем, що міститься в проміжку постійного магніту. На невеликій відстані навколо якоря розміщено обмотку нерухомої котушки. У результаті впливу акустичних хвиль на таку систему в котушці виникає ЕРС.

Електромагнітні мікрофони не набули значного поширення через великі нерівномірності АЧХ.

Спрямовану дію у відповідному мікрофоні забезпечують акустичною антеною, призначення якої полягає в посиленні акустичних сигналів, що приходять основним напрямком, та істотне послаблення сигналів з усіх інших напрямків.

Нині є декілька типів акустичних антен, які визначають такі типи спрямованих мікрофонів: *комбіновані, групові, із параболічним рефлектором*. Своєю чергою *групові спрямовані мікрофони* розподіляють на *лінійні групи, трубчасті органного типу, трубчасті щілинні, фазовані ґратки*.

Основними технічними характеристиками спрямованих мікрофонів є діаграма спрямованості (ДС) та індекс спрямованості (ІС).

Діаграма спрямованості – це чутливість мікрофона, залежно від кута між робочою віссю мікрофона й напрямком на джерело звуку. Її визначають у межах заданої смуги частот. Зазвичай використовують нормовану ДС.

Індекс спрямованості показує обчислену в децибелах різницю рівнів потужності сигналів на виході мікрофона від двох джерел звуку: одного (наприклад, голос людини), розташованого на осі, і другого – джерела розсіяних звукових хвиль (наприклад, шум автотраси), якщо обидва створюють у точці розташування мікрофона однаковий акустичний тиск.

Зазвичай це приймачі тиску і градієнта тиску, що реагують відповідно на значення та зміну значення акустичного сигналу.

Найпростіша комбінація цих приймачів, найбільш часто застосовувана на практиці, складається з одного мікрофона – приймача тиску й одного мікрофона – приймача градієнта тиску, що розташовуються якомога ближче один до того (зазвичай один над другим) і так, щоб їхні осі були паралельними. Комбіновані мікрофони є найпростішим видом спрямованих мікрофонів, тому що становлять систему, що складається із двох типів акустичних приймачів-мікрофонів.

У табл. 5.1 наведено основні характеристики акустичних приймачів-мікрофонів.

Таблиця 5.1

Основні характеристики акустичних приймачів-мікрофонів

Типи мікрофонів	Діапазони частотної характеристики, Гц	Нерівномірність відтворюваних частот, дБ	Осьова чутливість на частоті 1 кГц, мВ м ² /н
Порошкові вугільні	300 – 3 400	20	1 000
Електродинамічні	30 – 15 000	12	1
Конденсаторні	30 – 15 000	5	5
Електретні	20 – 18 000	2	1
П'єзоелектричні	100 – 5 000	15	50
Електромагнітні	300 – 5 000	20	5

Змінюючи параметри акустичних приймачів-мікрофонів, можна визначати різні характеристики спрямованості та, відповідно, індекси спрямованості всієї системи.

До *групових акустичних приймачів* належать лінійні групи, трубчасті мікрофони та фазовані ґратки.

5.3.7. Несанкціонований запис на диктофон

Здійснення негласного звукозапису є найбільш поширеним способом агентурного шпигунства. Із цією метою використовують спеціальні пристрої, які складаються з мікрофона та магнітофона. Подібні пристрої дістали назву *диктофонів*. Зазвичай, запис на диктофон здійснюють у приміщеннях.

Звукозапис у приміщеннях здійснюють в умовах акустичних перешкод, що виникають у результаті перевідбивань звукових хвиль від внутрішньої обстановки приміщень, а також акустичних шумів, створюваних людьми, різного роду вібраціями, стуками тощо.

Вплив акустичних шумів на розбірливість мовлення й динамічний діапазон зареєстрованої інформації можна оцінити значенням порога чутності.

Поріг чутності визначають мінімальним значенням звукового тиску, за якого ще можливе смислове сприйняття мовного повідомлення.

Поріг чутності безпосередньо пов'язано з *рівнем акустичних шумів*. В умовах шуму й перешкод поріг чутності називають *акустичним маскуванням*.

Значення акустичного маскування визначають підвищенням порогу чутності для прийнятого звукового сигналу.

Для поліпшення розбірливості мовлення, здобутої в результаті прихованого звукозапису, використовують різні фільтри. Вони є особливо ефективним, якщо фіксацію інформації здійснювали на фоні потужних, але зосереджених по спектру перешкод або специфічно забарвлених шумів.

У найпростішому випадку можна використовувати широковідомі еквалайзери. Але, зазвичай, застосовують спеціально розроблені пристрої, наприклад, цифрові нелінійні адаптивні фільтри, призначені для оброблення зашумлених мовних сигналів у реальному масштабі часу.

Більш досконалыми вважають *програмно-апаратні комплекси очищення мовлення*. Їх використовують для очищення живого звуку та звукозапису, підвищення розбірливості та якості мовлення в умовах неефективних

каналів зв'язку а також під час виділення джерела звуку в умовах шумного виробництва.

5.3.8. Пристрої високочастотного нав'язування

Під *високочастотним нав'язуванням* (ВЧ-нав'язуванням) розуміють спосіб несанкціонованого здобування мовної інформації, заснований на зондуванні потужним ВЧ-сигналом заданої області простору. Він полягає в *модуляції електромагнітного зондувального сигналу мовним* у результаті їхнього одночасного впливу на елементи обстановки або спеціально впроваджені пристрої.

Нині метод ВЧ-нав'язування широко застосують у телефонних лініях для акустичного прослуховування приміщень через мікрофон покладеної на апарат телефонної трубки.

Принцип реалізації методу полягає в тому, що в телефонну лінію щодо загального корпусу (як такий, наприклад, використовують контур заземлення або труби парового опалення) на один із проводів подають ВЧ-коливання від спеціального генератора-передавача. Через елементи схеми телефонного апарату (ТА), навіть якщо трубка не є знятою, вони надходять на мікрофон і модулюються мовленням співрозмовників, які нічого не підозрюють.

Приймання інформації здійснюють також щодо загального корпусу, але вже через другий провід лінії.

Основні *переваги* методу полягають в активації модуляторів ВЧ-сигналу (нелінійних елементів) тільки на момент знімання інформації, а також у можливості (у ряді випадків) вести акустичний контроль за приміщеннями без безпосереднього проникнення для встановлення закладних пристроїв.

До *недоліків* методу належать такі: мала дальність дії та високий рівень опромінювальних сигналів.

5.3.9. Оптико-акустична апаратура перехоплення мовної інформації

Великий інтерес становить використання лазерних мікрофонів. Принцип роботи цих пристроїв, які дістали назву *лазерні системи акустичної розвідки* (ЛСАР), полягає в такому. Генероване лазерним передавачем випромінювання *поширюється* через атмосферу, *відбивається*

від поверхні віконного скла, водночас, *модулюється* згідно із законом акустичного сигналу, який також впливає на скло, *повторно долає* атмосферу та *приймається фотоприймачем*, що відновлює розвідувальний сигнал.

Контрольні запитання

1. Що розуміють під гідроакустичною розвідкою?
2. Які основні завдання вирішує гідроакустична розвідка?
3. Якими є характеристики апаратури гідроакустичної розвідки?
4. Які хвилі можуть утворюватися в рідині та газах?
5. Які хвилі можуть утворюватися у твердому тілі?
6. Яку швидкість звукової хвилі називають коливальною?
7. Який вигляд має залежність між акустичною потужністю W і звуковим тиском?
8. Що називають інтенсивністю (силою) звуку?
9. Від яких трьох параметрів залежить швидкість акустичних хвиль у морському середовищі?
10. Якими причинами обумовлено загасання звуку в океані?
11. Яке явище прийнято називати реверберацією звукової хвилі?
12. Яке явище прийнято називати рефракцією звукової хвилі?
13. Яке явище прийнято називати звуковим підводним каналом?
14. Що використовують у гідролокаторі для виявлення та визначення координат цілі?
15. У чому полягає принцип роботи пристроїв, які дістали назву лазерних систем акустичної розвідки?
16. У чому полягає принцип реалізації методу високочастотного нав'язування?
17. Які пристрої використовують для поліпшення розбірливості мовлення, здобутої в результаті прихованого звукозапису?
18. Що є основними технічними характеристиками спрямованих мікрофонів?
19. На чому засновано принцип дії порошкового вугільного мікрофона?
20. Як розподіляють засоби ГАР за принципом використання енергії акустичного випромінювання?
21. На чому засновано принцип дії ЗП мікрофонного типу?

Розділ 2.

Фізичні основи технічної розвідки 2

6. Фізичні основи захисту від радіаційної розвідки

Мета: розглянути основні поняття, напрями, цілі, принципи та завдання й походження радіаційної розвідки; основні характеристики радіоактивних випромінювань; методи та прилади для вимірювання іонізувальних випромінювань; характеристики детекторів іонізувальних випромінювань.

Основні питання

6.1. Основні поняття.

6.2. Прилади для вимірювання іонізувальних випромінювань.

6.3. Загальна характеристика методів реєстрації іонізувальних випромінювань.

6.4. Загальні характеристики детекторів іонізувальних випромінювань.

Ключові слова: радіаційна розвідка; розвідувальна апаратура; класифікація радіаційної розвідки; іонізувальні випромінювання; технічні засоби радіаційної розвідки; детектори іонізувальних випромінювань.

Професійні компетентності:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

здатність розуміти основні напрями, цілі, фундаментальні принципи радіаційної розвідки; фізичні основи захисту від радіаційної розвідки з погляду захисту інформації.

Рекомендована література [1; 9; 12; 17].

6.1. Основні поняття

Під **радіаційною розвідкою** (РДР) розуміють процес здобування інформації в результаті аналізу радіоактивних випромінювань, пов'язаних із таким:

викидами та відходами атомного виробництва;

зберіганням і транспортуванням матеріалів, що розщеплюють;

ядерних зарядів і боєприпасів;
виробництвом та експлуатацією реакторів;
експлуатацією двигунів;
радіоактивним зараженням місцевості.

За допомогою РДР визначають таке:

дозові характеристики навколо об'єкта розвідки та їхні зміни в часі;
маршрути перевезення джерел радіоактивних випромінювань;
райони з підвищеним рівнем радіації;

джерела радіоактивних випромінювань у транспортному засобі;

уміст окремих видів ізотопів у навколишньому середовищі (ґрунті, повітрі, природних і промислових водоймах);

ізотопний склад випромінювачів, типи джерел випромінювання.

За допомогою РДР також здійснюють дозиметричний контроль за атмосферою Землі.

6.1.1. Явище радіоактивності.

Властивості радіоактивних випромінювань

Радіоактивність становить самовільний розпад ядер атомів, підпорядкований певному статистичному закону. Радіоактивні перетворення відбуваються зі зміною будови, складу й енергетичного стану ядра та супроводжуються випусканням або захопленням заряджених частинок і виділенням короткохвильового випромінювання електромагнітної природи (γ -випромінювання). Залежно від роду частинок, що випускаються або поглинаються ядром, розрізняють:

- 1) α -розпад;
- 2) β -розпад, електронний і позитронний;
- 3) електронне захоплення.

У разі α -розпаду ядро випускає позитивно заряджену α -частинку, що складається із двох протонів і двох нейтронів, водночас атомний номер елемента зменшується на дві, атомна вага – на чотири одиниці.

У разі електронного β -розпаду у ядрі відбувається перетворення нейтрона на протон, у результаті чого випускається електрон (β -частинка), атомний номер елемента збільшується на одиницю, атомна вага практично не змінюється.

Позитронний β -розпад характеризується перетворенням протона на нейтрон і випусканням позитрона (β^+ -частинка).

Електронне захоплення становить різновид β -перетворень. Як і позитронний розпад, воно характеризується перетворенням протона на нейтрон, але супроводжується захопленням електрона з K -оболонки (K -захоплення) або L -оболонки атома (L -захоплення). Заряд ядра зменшується на одиницю, атомна вага практично не змінюється.

Крім зазначених основних видів радіоактивних перетворень відомі *спонтанний поділ ядер* та *ізомерний перехід*. У першому випадку ядро розщеплюється на приблизно однакові половинки, у другому – змінюється енергетичний рівень ядра, склад залишається без зміни.

Розрізняють природну та штучну радіоактивність.

Природні радіоактивні елементи (U, Th, Ra та ін.) повсюдно поширено у природі. *Штучні* радіоактивні елементи створюють у результаті тих чи тих ядерних реакцій. Отже, радіоактивність супроводжується виникненням двох видів випромінювань: корпускулярного, що становить потоки швидкорухомих частинок (α -, β -, нейтронний, протонний), й електромагнітного (γ -випромінювання, рентгенівське). γ -кванти короткохвильового випромінювання, що супроводжують радіоактивний розпад, рухаються зі швидкістю світла c , володіють енергією та імпульсом.

Довжина хвиль γ -променів, що випромінюються природними радіоактивними елементами, перебуває в діапазоні $1,2 \cdot 10^{-8} - 4,7 \cdot 10^{-11}$ см. Енергія γ -квантів змінюється від 0,01 до 2,6 МеВ. Вони не мають заряду, тому не відхиляються в магнітному полі під час руху.

Природа частинок визначає властивості того чи того виду радіоактивних випромінювань і їхню дію на навколишнє середовище.

До *властивостей радіоактивних випромінювань*, які використовують у практиці радіоактивних методів розвідки, зараховують такі:

- 1) здатність проникати через речовину;
- 2) іонізацію газів, рідин і твердих тіл;
- 3) виділення теплоти у процесі радіоактивного розпаду;
- 4) дія на фотографічну платівку;
- 5) здатність викликати світіння люмінесцентних речовин;
- 6) здатність викликати хімічні реакції та розпад молекул (у разі тривалого дії випромінювання змінюється забарвлення навколишніх предметів).

Іонізувальна дія радіоактивних випромінювань є однією з основних властивостей, використовуваних у радіометрії. Завдяки цій властивості вдається виявляти радіоактивні елементи під час пошуків за допомогою газорозрядних лічильників та іонізаційних еманометрів, встановлювати

природу радіоактивності та визначати вміст радіоактивних елементів у породах і рудах.

Зазначимо основні властивості нейтронів.

По-перше, вони відрізняються високою проникною здатністю, яка перевершує проникну здатність γ -променів.

По-друге, для нейтронів характерні дифракція, відбивання, поляризація тощо.

По-третє, під час взаємодії нейтронів із ядрами більшості елементів відбуваються різні ядерні реакції, що супроводжуються випусканням заряджених частинок і γ -квантів та утворенням штучних радіоактивних елементів.

На відміну від заряджених частинок, нейтрони не іонізують гази, проте ядра елементів, які захопили нейтрони, можуть випускати α -частинки або протони, здатні вибивати електрони з оболонок атомів. Крім того, речовина іонізується ядрами віддачі у процесі розсіювання нейтронів.

6.1.2. Основні характеристики радіоактивних випромінювань

Основними характеристиками радіоактивності є такі:

швидкість радіоактивного розпаду;

кількість (активність) радіоактивної речовини;

доза випромінювання;

рівень радіації;

ступінь зараження радіоактивними речовинами.

Швидкість розпаду не залежить від зовнішніх умов і її визначають лише за властивостями цього радіоактивного ізотопу. Тому для будь-якої кількості цього радіоактивного ізотопу виконується такий закон: половина загальної кількості ядер радіоактивних атомів розпадається завжди за однаковий час. Цей час називають *періодом напіврозпаду* T .

Для різних ізотопів період T напіврозпаду коливається в дуже широких межах.

Кількість радіоактивної речовини прийнято оцінювати його активністю, під якою розуміють кількість радіоактивних розпадів атомів за одиницю часу.

Дозою випромінювання називають енергію випромінювання, поглинену в одиниці об'єму або ваги речовини за весь час його дії. Доза випромінювання характеризує ступінь іонізації речовини: чим вищою є доза, тим вищим є ступінь іонізації. За одиницю вимірювання дози γ -випромінювання в повітрі прийнято рентген (Р).

Рівень радіації (потужність дози). Інтенсивність γ -випромінювання характеризують рівень радіації. Рівень радіації є потужністю дози випромінювання. Він дорівнює дозі, створюваній за одиницю часу, тобто характеризується в рентгенах на годину (Р/год).

Ступінь зараження місцевості радіоактивними речовинами характеризує густина зараження.

Густину зараження вимірюють кількістю радіоактивних розпадів атомів, що відбуваються за одиницю часу на одиниці поверхні, в одиниці об'єму або ваги, тобто одиницями питомої активності.

6.2. Прилади для вимірювання іонізувальних випромінювань

Здобування відомостей про іонізувальні випромінювання зведено до вирішення чотирьох *основних видів вимірювальних завдань*:

вимірювання параметрів і характеристик іонізувальних частинок та квантів;

вимірювання характеристик потоку або поля іонізувальних випромінювань;

вимірювання величин, що характеризують взаємодію випромінювання з речовиною і передавання йому енергії;

вимірювання параметрів і характеристик джерел іонізувальних випромінювань.

Прилади для вимірювання фізичних величин, що характеризують іонізувальні випромінювання, розподілено на чотири *основні групи*:

1) дозиметричні прилади (дозиметри), які вимірюють величини, що характеризують перенесення й передавання енергії іонізувального випромінювання;

2) радіометричні прилади (радіометри), що вимірюють величини, які характеризують джерела іонізувальних випромінювань і кількість частинок та квантів, що випускаються ними у простір;

3) спектрометричні прилади (спектрометри), що вимірюють розподіл частинок і квантів за енергією, зарядами, масами, у просторі та часі;

4) універсальні прилади.

До *радіометрів* належать прилади, призначені для вимірювання активності ізотопу у джерелах випромінювання або густини потоку частинок і квантів іонізувального випромінювання. Радіометри забезпечують рішення двох груп вимірювальних завдань: визначення параметрів поля або характеристик джерела випромінювання. Під час вимірювання активності ізотопу у джерелі необхідно визначити кількість розпадів за одиницю

часу. В іншій групі завдань, що вирішують радіометрами, визначають параметри поля, створюваного джерелом іонізуючого випромінювання в точці розташування детектора. У цьому разі вимірюють кількість частинок або квантів, що пройшли через одиничну поверхню (потік), або кількість частинок або квантів, що проходять через одиничну поверхню за одиницю часу (густина потоку).

Одна з основних якостей радіометра – це вибірковість щодо корисного, а також до фонових або супутніх компонентів випромінювання, шумових сигналів і сигналів перешкоди. Цієї вибіркості досягають різними способами на різних етапах перетворення інформації у приладі.

Підвищення селективності радіометричних вимірювань досягають відбором за певними ознаками електричних сигналів із детекторів. Для цього бажано використовувати пропорційні дискретні детектори. У них параметри сигналу (амплітуду, геометричну форму, час появи) пов'язано з енергією, видом частинок або квантів, моментом їхнього потрапляння в чутливий об'єм детектора. Конкретні електричні схеми окремих типів приладів відрізняються великою різноманітністю.

Радіометри, призначені для пішохідних пошуків, мають спрощену схему, що обумовлено підвищеними вимогами до економічності живлення, портативності та ваги.

До *дозиметричної апаратури* належать прилади, призначені для вимірювання енергії, яку переносять іонізуючі випромінювання або переданої об'єкту, що міститься в полі випромінювання (поглинену дозу й потужність дози випромінювання, експозиційну дозу й потужність дози γ і рентгенівського випромінювань, інтенсивність та інші величини, що характеризують поле й джерела випромінювання або процеси взаємодії іонізуючих випромінювань із речовиною).

Залежно від вимірюваних фізичних величин, *дозиметричні прилади* розподіляють на такі підгрупи:

вимірювачі поглиненої, еквівалентної й експозиційної доз, потужності поглиненої, еквівалентної та експозиційної доз, потужності енергії іонізуючого випромінювання, перенесення енергії, потоку енергії;

вимірювачі густини потоку енергії (інтенсивності).

Загальним для всіх дозиметричних приладів є необхідність у вимірюванні тих чи тих енергетичних величин, які описують не окремі частинки або кванти, а їхню деяку сукупність, що перебуває у просторі протягом деякого часу.

До *спектрометрів іонізувальних випромінювань* належать прилади, які встановлюють розподіл частинок або квантів випромінювання за одним або декількома параметрами, наприклад за енергіями частинок або квантів, видом випромінювання (масою частинок і їхнім зарядом), а також за характеристиками руху частинок або квантів у просторі (кутовою спрямованістю, траєкторією).

Відповідно, спектрометри розподіляють на такі підгрупи для вимірювання *розподілу випромінювань* за:

енергіями (енергетичні спектрометри);

масами (масові спектрометри частинок);

зарядами (зарядові спектрометри частинок);

просторово-часовими характеристиками розподілу випромінювань (кутові спектрометри).

У деяких випадках виконують вимірювання не за одним, а за декількома параметрами, спектрометри для таких вимірювань називають *багатопараметровими*.

За допомогою спектрометричних приладів визначають спектр, тобто сукупність значень, які може набирати ця фізична величина (енергія, заряд, маса та ін.).

Результати вимірювань подають у вигляді енергетичних, масових, кутових та інших розподілів залежності відносної кількості частинок або квантів у потоці чи тих, які випускаються джерелом випромінювання, від значення параметра.

Залежно від можливих значень параметра, спектральні розподіли бувають **дискретними** та **суцільними** (безперервними).

Найбільш важливими характеристиками будь-якого спектрометра, крім його призначення, тобто виду вимірюваного випромінювання, параметра, за яким вимірюють розподіл, і діапазону зміни параметра, є *точність визначення спектрального розподілу й похибка обчислення значення параметра*, відповідного певним ділянкам (піків) у розподілі. Ці характеристики пов'язано з такими параметрами спектрометра, як кількість каналів, ефективність, лінійність, відносний дозвіл (роздільна здатність).

Важливим параметром сучасних спектрометрів вважають їхню *ефективність*. Від ефективності залежить час, необхідний для вимірювання спектра. Оскільки реально на спектрометр діє, крім вимірюваного, також заважальне (фонове) випромінювання, за низької ефективності спектральні піки можуть маскуватися фоном, і точність вимірювань погіршується.

Спектрометри забезпечують *якісний* (тобто визначення виду випромінювання, енергії тощо), або *кількісний* (визначення співвідношень між густиною потоку випромінювань різного виду, енергії, визначення частки випромінювання певного виду або енергетичного діапазону в загальному потоці випромінювання) а також аналіз іонізуючого випромінювання.

Якісний аналіз здійснюють за положенням спектральних ліній на спектрограмі, розміченої за допомогою попереднього градування у значеннях вимірюваного параметра A (рис. 6.1, 6.2).

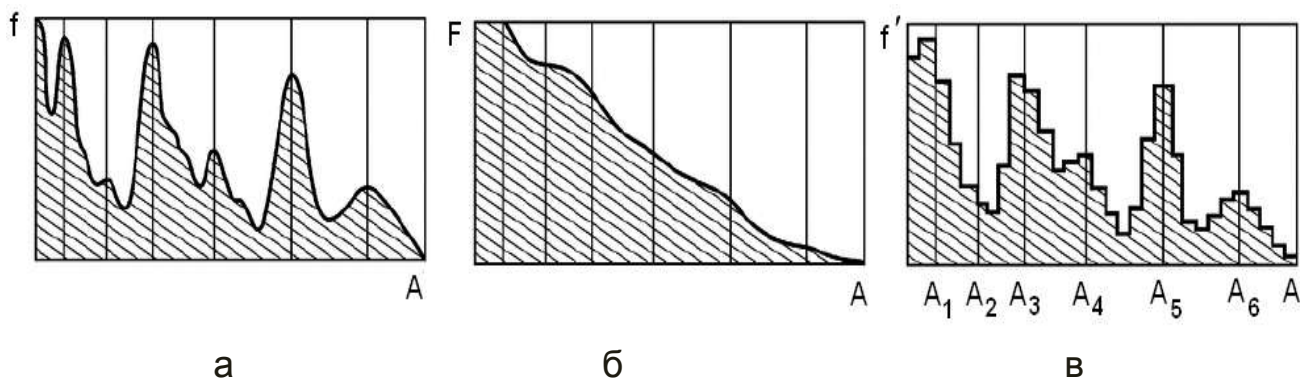


Рис. 6.1. Безперервні спектральні розподіли: а) диференціальний; б) інтегральний; в) диференціальний у вигляді гістограми

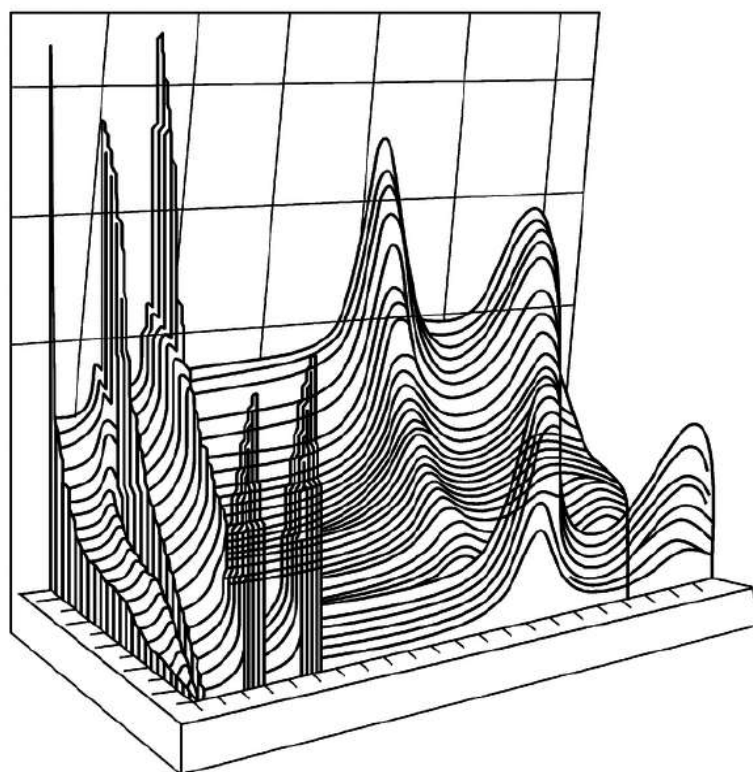


Рис. 6.2. Багатопараметричний розподіл сигналів

Для *кількісного аналізу* необхідно знати ефективність діапазону вимірювань.

Методи побудови спектрометрів. Визначення енергії частинок або квантів, зазвичай, засновано на вимірюванні функції розподілу за параметром, однозначно пов'язаним зі значенням енергії. Можна виділити чотири основні методи вимірювання енергетичних розподілів:

із лінійним перетворенням енергії частинок або квантів на амплітуду сигналу та визначенням амплітудного розподілу;

із вимірюванням інтервалів часу, протягом яких частинки проходять певну відстань (за часом прольоту);

із вимірюванням спектра питомих утрат енергії в речовині детектора (спектра лінійних втрат);

за координатами, через які проходять частинки після їхнього відхилення в електричному або магнітному полі.

Основним елементом усіх вимірювальних приладів є детектор іонізувальних випромінювань, тобто пристрій, що перетворює енергію випромінювання на інші види, зручні для реєстрації.

Детектори, що застосовують у радіометричних приладах, розрізняють за таким:

принципом дії (використовуваним для перетворення енергії випромінювання ефекту);

станом середовища, у якій спостерігають ефект від дії випромінювання.

6.3. Загальна характеристика методів реєстрації іонізувальних випромінювань

Іонізувальні випромінювання можна зареєструвати за результатами їхньої взаємодії з речовиною. Наслідком взаємодії випромінювань можуть бути:

пружне розсіювання;

непружне розсіювання;

поглинання.

Цими процесами обумовлено різні ефекти в середовищі поширення іонізувального випромінювання. До таких *ефектів* належать:

виділення тепла;

іонізація та збудження атомів і молекул;

хімічні зміни складу речовини та ін.

У військовий дозиметрії найбільшого поширення набули іонізаційний, люмінесцентний і хімічний методи.

Іонізаційний метод засновано на дії іонізуювальних випромінювань. Утворені під дією іонізуювального випромінювання іони й електрони підвищують електропровідність речовини, що опромінюється, і якщо до нього прикласти різницю потенціалів, то в колі зовнішнього джерела живлення виникне електричний струм. Амплітуда, тривалість і частота проходження імпульсів цього струму або його сила певним чином пов'язані із властивостями іонізуювальних частинок і параметрами випромінювання, а також характеристиками електричного поля та речовини, що опромінюється. У зв'язку із цим вимірювання параметрів іонізуювальних випромінювань може бути зведено до вимірювання параметрів електричних сигналів.

Як детектори в іонізаційному методі використовують *іонізаційні камери, газорозрядні лічильники, напівпровідникові детектори*.

Люмінесцентний метод реєстрації іонізуювальних випромінювань засновано на вимірюванні світлосуми або інтенсивності світлових спалахів, що виникають під дією випромінювань у речовині під час повернення одиничних збуджених атомів і молекул або їхніх асоціацій в основний стан.

Явище люмінесценції, яку збуджують іонізуювальні випромінювання, називають *радіолюмінесценцією*, а люмінесцирувальні речовини – *люмінофорами*.

На основі нестимульованої люмінесценції розроблено сцинтиляційні детектори іонізуювального випромінювання, а на основі стимульованої – радіофотолюмінесцентні та термолюмінесцентні.

Хімічний метод реєстрації іонізуювальних випромінювань засновано на визначенні хімічних змін, що відбуваються в речовинах під час їхнього опромінення. Продукти хімічних реакцій визначають або безпосередньо за зміною кольору, або побічно за допомогою методів хімічного та фізико-хімічного аналізу. Кількість продуктів, що утворюються в результаті таких реакцій, є тим більшою, чим вищою доза випромінювання.

За допомогою хімічного методу можна вимірювати дози від сотих частинок грея до багатьох кілогрей.

До того ж хімічний метод є набагато простішим за інші.

6.4. Загальні характеристики детекторів іонізуювальних випромінювань

Основні характеристики детекторів – це ефективність реєстрації, чутливість, рівень власного фону, часова й енергетична роздільна здатність.

Іонізаційна камера – це один з основних типів детекторів іонізувальних випромінювань, що застосовують у дозиметричній апаратурі для вимірювання дози й потужності дози випромінювання. Іонізаційна камера становить у найпростішому випадку пристрій, що складається із двох ізольованих один від того електродів, до яких підведено напругу, тобто є різновидом газового конденсатора. Іонізаційні камери такого типу називають *повітряними*.

У звичайних умовах газу не містять вільних носіїв електричного заряду, електричний струм у ланцюзі камери є відсутнім. У разі впливу іонізувального випромінювання в газі іонізаційної камери утворюються носії вільного електричного заряду. У загальному випадку сила струму в колі іонізаційної камери, обумовлена іонізацією, залежить від напруги на камері, оскільки його значення визначає частку зарядів, які досягли електродів. Така залежність називають вольт-амперною характеристикою іонізаційної камери.

Газорозрядні лічильники широко застосовують у дозиметричній апаратурі, призначеній для вимірювання таких фізичних величин, як потужність дози випромінювання, густина потоку іонізувальних частинок. Їхня основна *перевага* – ще висока чутливість. Газорозрядний лічильник здатний зареєструвати майже кожну іонізувальну частинку, проникаючу у його об'єм зі стінок лічильника або навколишнього простору. Водночас на виході лічильника виникає досить великий електричний сигнал, що дозволяє використовувати просту електричну схему для реєстрації іонізувального випромінювання.

Є багато типів газорозрядних лічильників, які відрізняються за призначенням, режимом роботи, конструкцією, механізмом газового розряду тощо.

У дозиметрії застосовують переважно *лічильники Гейгера – Мюллера*, що працюють у режимі нестабільного самостійного розряду, у яких утворений електричний заряд не залежить від первинної іонізації.

У сучасній дозиметричній апаратурі як детектор іонізувальних випромінювань використовують напівпровідники. Цей напівпровідник є аналогом газонаповненої іонізаційної камери, але в основі роботи детектора лежить іонізація атомів твердого тіла. Особливості роботи напівпровідникового детектора визначають електричними властивостями напівпровідникових матеріалів, що застосовують для виготовлення детекторів. Основними є германій і кремній.

Такі якості напівпровідникових детекторів (НПД), як висока чутливість до γ -нейтронного випромінювання, лінійність дозиметричних характеристик, можливість реєстрації одного виду випромінювання на фоні іншого, висока енергетична і часова роздільна здатність, малі габарити, висока точність, низька напруга живлення та ін., визначають перспективність їхнього використання для вирішення завдань дозиметрії.

У розрахунку на однакову поглинену енергію в напівпровідниковому детекторі утворюються приблизно на порядок більше носіїв електричних зарядів, ніж в іонізаційній камері. Оскільки густина речовини напівпровідникового детектора на кілька порядків (10^3) є вищою, ніж густина газу в іонізаційній камері, то й значення поглиненої енергії в напівпровідниковому детекторі на стільки ж порядків є більшим, ніж у газонаповнених. Це визначає їхню головну перевагу – високу чутливість за малих розмірів.

На основі напівпровідникового методу γ -спектрометрії може бути вирішено цілий ряд прикладних завдань:

- а) визначення спектра γ -випромінювання;
- б) визначення ізотопного складу γ -випромінювачів;
- в) визначення віку продуктів ядерного вибуху;
- г) визначення у продуктах ядерного вибуху ізотопів "наведеної активності", що виникають у ґрунті під час впливу на нього нейтронів.

Сцинтиляційний метод реєстрації засновано на використанні властивостей деяких речовин-сцинтиляторів, які можуть *світитися під дією іонізуючих випромінювань*.

Світлові спалахи реєструють за допомогою фотоелектронного помножувача (ФЕП) та електронної схеми.

Сучасний сцинтиляційний детектор становить поєднання сцинтилятора, у якому енергія іонізуючих випромінювань перетворюється на світлову енергію, й оптично з'єданого з ним фотоелектронного помножувача (ФЕП), який перетворює світлову енергію на електричний імпульс.

Сцинтиляційні детектори можна з успіхом використовувати для реєстрації γ - та нейтронного випромінювання, підрахунку кількості частинок і визначення їхньої енергії.

Чутливість сцинтиляційних детекторів є на кілька порядків вищою за іонізаційних камер і газорозрядних лічильників. Водночас високі чутливість до випромінювання й роздільна здатність роблять ці детектори незамінними в ряді випадків для радіо- та спектрометрії.

Останнім часом широко застосовують пластмасові сцинтилятори, що становлять тверді розчини сцинтилювальних органічних речовин у полімерах. Такі сцинтилятори можна успішно використовувати не тільки у процесі дозиметрії γ -випромінювання окремих ізотопів або продуктів ядерного вибуху, але й радіометричних вимірів.

Сцинтиляційні детектори, крім дозиметричних і радіометричних вимірювань у рахунковому та струмовому режимах роботи, може бути використано для спектрометричних вимірювань.

Радіофотолюмінесценція (РФЛ) – це таке явище, коли речовина, спочатку не люмінесціює під час зруйнування ультрафіолетовим світлом, стає чутливою до нього після впливу іонізуювальних випромінювань. Водночас центри люмінесценції практично не руйнуються під час впливу збуджувального світла.

Явища РФЛ виявляють у розбавлених затверділих розчинах солей срібла, іонних кристалах типу лужних галоїдів, а також у деяких стеклах, особливо алюмофосфатного типу. Центри люмінесценції, що виникли під час опромінення РФЛ-детекторів, утворюють смуги поглинання у близькому ультрафіолеті.

Збудження ультрафіолетовим світлом у межах цих смуг викликає видиму помаранчеву люмінесценцію, інтенсивність якої є пропорційною поглиненій дозі випромінювання.

Під **термолюмінесценцією** розуміють процес, за якого накопичена у кристалі енергія іонізуювального випромінювання перетвориться на енергію флюоресценції під дією теплового збудження.

Люмінесцентні детектори використовують у вимірювачах дози різного призначення. РФЛ-детектори дозволяють виміряти дози випромінювання від мілірад до тисяч рад. Нижня межа вимірювань є обмеженою переважно двома чинниками: дозовою люмінесценцією та параметрами пристроїв.

Принцип роботи **хімічних детекторів** засновано на визначенні хімічних змін речовини, їхнього чутливого об'єму, що відбуваються в результаті впливу іонізуювальних випромінювань. Водночас слід пам'ятати, що значення цих змін залежить від кількості поглиненої енергії робочим об'ємом детектора.

Фотографічний метод роботи детекторів засновано на використанні впливу електромагнітних випромінювань на фотоемульсію. Чутливий шар фотоплівки складається з великої кількості дрібних кристалів

бромистого срібла AgBr . Під дією радіоактивних випромінювань після проявлення плівки бромисте срібло відновлюється до металевого срібла. У результаті засвічені ділянки плівки потемніють, а незасвічені – будуть прозорими.

Установлено, що густина почорніння негативу є пропорційною дозі γ -випромінювання. За густиною почорніння негативу можна визначити дозу γ -випромінювань.

Контрольні запитання

1. Що розуміють під радіаційною розвідкою?
2. Що визначають за допомогою радіаційної розвідки?
3. Яке явище називають радіоактивністю?
4. Чим характеризується позитронний β -розпад?
5. Як створюють штучні радіоактивні елементи?
6. Які властивості радіоактивних випромінювань належать до таких, що так чи так використовують у практиці радіоактивних методів розвідки?
7. Що є основними характеристиками радіоактивності?
8. Яку величину називають дозою радіоактивного випромінювання?
9. Яку величину називають рівнем радіації?
10. Як вимірюють густина зараження?
11. Якими є чотири основні види вимірювальних завдань щодо здобування відомостей про іонізуючі випромінювання?
12. На які чотири основні групи розподілено прилади для вимірювання фізичних величин, що характеризують іонізуючі випромінювання?
13. На які підгрупи розподіляють дозиметричні прилади, залежно від вимірюваних фізичних величин?
14. Які прилади належать до спектрометрів іонізуючих випромінювань?
15. Як здійснюють якісний аналіз за допомогою спектрометрів?
16. Якими є чотири основні методи вимірювання енергетичних розподілів частинок?
17. Які явища можуть бути наслідком взаємодії іонізуючого випромінювання, що можна зареєструвати за результатами його взаємодії з речовиною?
18. На чому засновано люмінесцентний метод реєстрації іонізуючих випромінювань?

19. На чому засновано фотографічний метод роботи детекторів іонізуювальних випромінювань?

20. На чому засновано принцип роботи хімічних детекторів іонізуювальних випромінювань?

7. Фізичні основи захисту від хімічної розвідки

Мета: розглянути основні поняття й походження хімічної розвідки; основні напрями, цілі, принципи та завдання хімічної розвідки; методи досліджень і хімічного аналізу й апаратуру наземної, повітряної та морської хімічної розвідки.

Основні питання

7.1. Основні поняття.

7.2. Методи й засоби вимірювань під час хімічної розвідки.

7.3. Методи хімічного аналізу.

Ключові слова: хімічна розвідка; розвідувальна апаратура; класифікація хімічної розвідки; методи досліджень і хімічного аналізу; технічні засоби наземної, повітряної та морської хімічної розвідки; контактна хімічна розвідка; захист від хімічної розвідки.

Професійні компетентності:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

здатність розуміти основні напрями, цілі, фундаментальні принципи хімічної розвідки; фізичні основи захисту від хімічної розвідки з погляду захисту інформації.

Рекомендована література [1; 9; 12; 17].

7.1. Основні поняття

Під **хімічної розвідкою (ХР)** розуміють здобування інформації шляхом контактного або дистанційного аналізу змін хімічних властивостей складу навколишнього середовища під таким впливом:

викидів і відходів виробництва;

роботи двигунів;

вибухів і пострілів;

навмисного розсіювання хімічних речовин;
випробувань і застосувань хімічної зброї;
аварій на підприємствах хімічної, текстильної, харчової та інших видів промисловості.

ХР вирішує такі *основні завдання*:

виявлення й аналіз хімічного складу навколишнього середовища, із метою визначення дислокацій підприємств із виробництва хімічної продукції військового призначення;

вимірювання концентрації хімічних речовин у повітрі, із метою визначення профілю виробництва, проведених наукових досліджень і випробувань, а також характеристик озброєння (О), військової техніки (ВТ) і їхніх елементів (палива, вибухових речовин тощо);

здобування інформації про хімічне зараження місцевості в умовах можливого застосування хімічної зброї;

контроль за хімічним складом навколишнього середовища на підприємствах хімічної промисловості для забезпечення персоналу.

ХР здійснюють за допомогою апаратури, що використовує як методи дистанційного аналізу (дистанційна ХР), так і аналізу проб (контактна ХР).

До апаратури дистанційної ХР належать:

лідари;

радіометри;

ІЧ-спектрометри.

Апаратура контактної аналізу містить:

газоаналізатори;

газосигналізатори;

пробовідбірні пристрої тощо.

Апаратура дистанційної ХР використовує принципи *активної* або *пасивної оптичної локації*.

Прикладом апаратури, що використовує принципи активної локації, є **лідар**.

Хімічні речовини в атмосфері виявляють шляхом зондування її імпульсами лазерного випромінювання й реєстрації ефектів взаємодії лазерного випромінювання з речовиною.

Радіометри використовують принцип пасивної оптичної локації. Вони виявляють речовини за їхнім власним тепловим випромінюванням.

ІК-спектрометри також виявляють речовини шляхом аналізу спектрального складу власного випромінювання речовини або перевідбитого

речовиною випромінювання природного джерела (Сонця, Місяця, зоряного неба тощо).

Застосування **приладів локальної дії і пристроїв пробовідбору** дозволяє визначити хімічний склад речовин у районі розвідки або лабораторії після відбору проби та її доставляння до місця оброблення.

Апаратуру ХР можна встановлювати на:

космічних апаратах (КА);

ракетах;

літаках;

гелікоптерах;

кораблях;

автомобілях,

а також використовувати в портативному варіанті.

На КА встановлюють радіометри та ІЧ-спектрометри. Видобувні дані (спектр випромінювання) або реєструють на фотоплівку з подальшим доставлянням у капсулах на Землю, або передають радіоканалом.

Повітряну ХР здійснюють із застосуванням пробовідбірних засобів у прикордонних районах.

Як носії до 20 км використовують повітроплавні засоби, на висотах понад 50 км – ракети.

Для розвідки використовують фільтрувально-повітряні установки, продуктивність яких досягає $(2 - 5) \cdot 10^4$ м³/год під час безперервної роботи (3 – 5) год.

Апаратура наземної й морської ХР містить прилади *локальної й дистанційної дії*. У приладах локальної дії виявлення речовин здійснюють шляхом відбору проби аналізованого середовища з подальшим аналізом фізичним, хімічним або біохімічним методами безпосередньо на місці взяття проби.

Типовим прикладом апаратури цього виду є ІЧ-гідроаналізатори, що дозволяють безперервно автоматично аналізувати повітря з порогом чутливості $10^5 - 10^6$ мг/л.

Розвідку із **застосуванням апаратури в портативному варіанті** здійснюють шляхом відбору проб із подальшим їхнім аналізом у лабораторних умовах.

Для виявлення й розпізнавання хімічних речовин у пробах **водного середовища, ґрунту та рослинності** застосовують *атомно-абсорбційні*

спектрофотометри. Із їхньою допомогою може бути виявлено та визначено до 70 різних хімічних елементів і сполук.

Під час роботи атомно-абсорбційного спектрофотометра в режимі автоматичного аналізу обробляють до 60 проб протягом години.

Для виявлення й розпізнавання багатьох хімічних речовин у **повітряному середовищі** застосовують хроматографічні аналізатори, мембранно-розділювальні детектори, мас-спектрометри, біолюмінесцентні прилади та ін.

7.2. Методи й засоби вимірювань під час хімічної розвідки

7.2.1. Контактна хімічна розвідка

Контактна ХР полягає у *відборі проб* атмосферного повітря, рідин, ґрунту, рослинності з подальшим їхнім аналізом різними методами.

Для селективного визначення окремих компонентів потрібно застосування різних методів і технічних засобів аналізу.

Для встановлення *концентрації металів в атмосферних аерозолях* широко використовують такі методи:

атомно-абсорбційного аналізу;

плазмового аналізу;

емісійного спектрального та рентгенофлуоресцентного аналізу;

протонного збудження характеристичного рентгенівського випромінювання.

Вони дозволяють досліджувати велику кількість мікродомішок у повітрі.

Для визначення *концентрації газоподібних речовин* значного розвитку набувають такі методи:

хемилюмінесцентний;

флуоресцентний;

УФ- та ІЧ-спектроскопії;

кореляційної спектроскопії;

полум'яно-іонізаційні та газової хроматографії.

Реалізують методи хімічного аналізу двома групами приладів для:

відбору проб повітря;

лабораторного аналізу проб.

До першої групи входять *поглинальні прилади* (переважно електроаспіратори), до другої – *прилади для лабораторного аналізу*.

7.2.2. Апаратура для відбору проб повітря. Поглиналильні пристрої

Спостереження за рівнем забруднення атмосферного повітря хімічними методами здійснюють шляхом відбору проб і їхнього аналізу. У процесі дослідження атмосферного повітря доводиться виконувати аналізи проб, у яких містяться дуже малі кількості речовин. Кількісний аналіз атмосферних забруднювальних речовин здійснюють після їхнього *концентрування*, яке виконують протягуванням аналізованого повітря через поглинальний пристрій або фільтр.

Рідинні поглинальні прилади. Речовини в газо- і пароподібному стані зазвичай уловлюють рідкими поглинальними середовищами, у яких визначається речовина безпосередньо розчиняється або взаємодіє з поглинальним розчином. До рідких поглинальних середовищ належать дистильована вода, органічні розчинники, спеціальні поглинальні розчини. Ефективність поглинання залежить від конструкції поглинального приладу. Для лабораторних досліджень атмосферного повітря використовують велику кількість поглинальних приладів. Суттєве значення має матеріал, із якого виготовлено прилади: він має бути інертний щодо досліджуваних речовин. Найбільш широко застосовують два типи рідинних поглинальних приладів (рис. 7.1):

U-подібний із пористою скляною платівкою;
прилад Ріхтера.

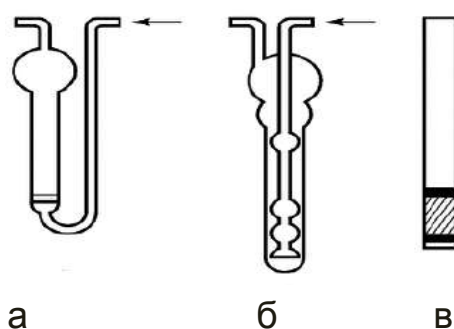


Рис. 7.1. Поглинальні прилади:
а) U-подібний; б) прилад Ріхтера; в) сорбційна трубка

U-подібний поглинальний прилад (рис. 7.1а) становить скляну U-подібну трубку зі впаяним у вигляді платівки фільтром. Фільтр зроблено з особливо приготованої спеченої маси скла з різними за розміром порами.

Поглиналий прилад Ріхтера (рис. 7.1б) становить скляну посудину, усередині якої вміщено циліндричну трубку з розширеннями. Центральний відросток є входом для досліджуваного повітря, а бічний – виходом.

Для поглинання газів і парів під час відбору проб повітря найбільш ефективним пристроєм є **сорбційна трубка** (рис. 7.1в). Сорбційну трубку виготовлено зі скла, має довжину 170 мм і діаметр 8 – 10 мм; в один кінець трубки впаяно дві перфоровані скляні платівки-перегородки. Простір між пластинами заповнено скляними гранулами-носіями, покритими плівкою спеціального розчину, що не висихає, – сорбентом.

Для вловлювання високодисперсних аерозолів – димів, туманів, пилу – використовують різні фільтрувальні матеріали: цупкі паперові (беззольні), мембранні, скловолокнисті фільтри та ін.

7.2.3. Витратоміри та збудники витрати

До апаратури для вимірювання витрати повітря ставлять підвищені вимоги, вимірювання виконують із максимальною ретельністю. Найбільш часто як витратоміри використовують *реометри, ротаметри, газові лічильники*.

Реометри. Різниця рівнів рідини є мірою витрати повітря, яку визначають за шкалою. Шкалу реометра градуують за показаннями контрольного витратоміра (рис. 7.2а).

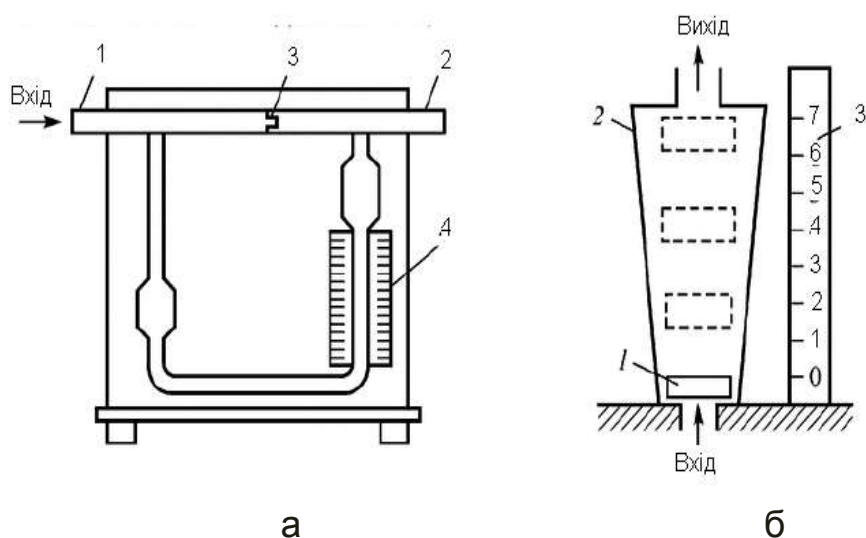


Рис. 7.2. Приклад роботи реометра (а) і ротаметра (б)

Ротаметри. Для вимірювання витрати повітря й газів за умови індивідуального градування на конкретний газ широко застосовують поплавкові ротаметри з місцевими показаннями.

Принцип дії ротаметра (рис. 7.2б) ґрунтується на сприйнятті поплавком 1 динамічного напору потоку газу, що проходить знизу вгору конусною трубою 2.

Збудники витрати. Електроаспіратори. Як збудники витрати повітря застосовують компресори, ротаційні та вібраційні насоси, побутові пилососи тощо. Збудники витрати використовують в електроаспіраторі для протягування повітря через поглинальні пристрої та фільтри, а також в автоматичних газоаналізаторах.

У загальному вигляді електроаспіратор є пристроєм, що складається із двох функціональних вузлів: збудника витрати повітря та витратоміра. Електроаспіратори використовують як самостійні прилади для відбору проб повітря або у складі технічних засобів у стаціонарних і пересувних лабораторіях.

Як збудник витрати в електроаспіраторах використовують ротаційну повітродувку.

7.3. Методи хімічного аналізу

7.3.1. Контактна хімічна розвідка

7.3.1.1. Спектрофотометричний метод

Відібрані за допомогою поглинальних приладів та електроаспіратора проби атмосферного повітря підлягають аналізу фізико-хімічними методами. До складу атмосферного повітря входять речовини дуже малої концентрації, тому під час аналізу мають застосовувати високочутливі методи.

Спектрофотометричний метод аналізу засновано на здатності забарвлених розчинів поглинати світло в діапазоні хвиль від ультрафіолетових до інфрачервоних. Поглинання залежить від властивостей речовини та його концентрації.

За спектрофотометричного методу аналізу досліджуваний компонент перетворюється на нову хімічну сполуку, що поглинає світло, потім

вимірюють кількість продукту реакції за світловим потоком, який пройшов через розчин.

Спектрофотометричні вимірювання зазвичай виконують за допомогою *спектрофотометрів* і *фотоелектроколориметра*. Дія цих приладів ґрунтується на зміні інтенсивності світлового потоку під час проходження через розчин, залежно від товщини шару, ступеня забарвлення та концентрації.

7.3.1.2. Метод газової хроматографії

Аналіз атмосферного повітря, забрудненого викидами промислових підприємств та автотранспорту, є вкрай складним завданням.

Хроматографічний метод засновано на поділі суміші речовин у динамічних умовах.

Із хроматографічних методів найбільш поширено *газову адсорбційну хроматографію*.

Зміна складу газової суміші й пов'язана з ним зміна фізичних параметрів викликає в чутливому вміщено (датчику) детектора відповідну зміну електричного кола, у яку включено датчик. На стрічці записується крива зміни в часі електричного потенціалу, пропорційного концентрації речовини в газі-носії на виході з колонки. За цією кривою (хроматограмою) судять про якісний і кількісний склад аналізованої суміші. Градування хроматографа здійснюють за стандартними сумішами.

7.3.1.3. Метод мас-спектрометрії та хромато-мас-спектрометрії

Принцип мас-спектрометрії полягає в іонізації молекул органічних речовин під впливом різних чинників (електронного удару, високочастотного іскрового розряду, хімічної й польової іонізації та ін.) за збереження основної молекулярної структури. Утворені у процесі розпаду порушених молекулярних іонів фрагменти розподіляються в мас-аналізаторі на пучки, що містять заряджені частинки певної маси й енергії, які реєструють у вигляді відповідних мас-спектрів.

Мас-спектрометрія дає можливість визначати значну кількість компонентів, має високу чутливість і швидкодією. У разі аналізу складних сумішей органічних і неорганічних сполук для їхньої ідентифікації необхідно чіткий поділ сполук та здобування однозначних характеристик.

Одночасне виконання цих вимог забезпечує мас-спектральний аналіз із попередніми хроматографічним поділом сполук і подальшим мас-спектрометричним детектуванням, так звана *хромато-мас-спектрометрія* (ХМС). Із наявних аналітичних методів ХМС-аналіз є найбільш універсальним.

Мас-спектрометр, який працює в режимі іонної мас-хроматографії, можна вважати найбільш селективним з усіх наявних детекторів за хроматографічного поділу компонентів складної суміші.

7.3.1.4. Метод атомно-абсорбційного спектрального аналізу аерозолів

Метод атомно-абсорбційного визначення металів (АА-метод) в аерозольних пробах, відібраних на фільтри Петрянова, засновано на абсорбції (поглинанні) світла атомами елементів, що визначають у разі введення аналізованого розчину проб у полум'я суміші ацетилену з повітрям. Поглинання є пропорційним вмісту елементів, що визначають.

7.3.1.5. Люмінесцентний метод

Люмінесценцією називають випромінювання світла тілами, що перевищує теплове за тієї самої температури й має тривалість більш ніж 10^{-10} с. Це випромінювання може бути викликано таким: бомбардуванням речовини електронами та іншими зарядженими частинками; пропусканням через речовину електричного струму (нетеплова дія), освітленням речовини видимим світлом, рентгенівськими та γ -променями, а також деякими хімічними реакціями в речовині.

Люмінесценцію, яка відразу припиняється після закінчення дії збудника світіння, називають *флюоресценцією*.

Люмінесценцію, що зберігається тривалий час після припинення дії збудника світіння, називають *фосфоресценцією*.

Люмінесценцію під дією світла називають *фотолюмінесценцією*; під дією бомбардування електронами – *катодолюмінесценцією*; під дією електричного струму й поля – *електролюмінесценцією*; під дією хімічних перетворень – *хемілюмінесценцією*; під дією рентгенівських променів – *рентгенофлюоресценцією*.

Люмінесцентний метод належить до найбільш чутливих емісійних методів визначення слідів органічних і неорганічних домішок у повітрі.

Прилади для люмінесцентного аналізу розподіляють на дві групи: *флюорометри* та *спектрофлюорометри*. Основна відмінність між ними полягає в тому, що у флюорометрах використовують світлофільтри, а у спектрофлюорометрах – дифракційні ґратки.

7.3.1.6. Метод інфрачервоної спектроскопії

Принцип полягає у вимірюванні поглинання енергії випромінювання аналізованим газом. Здатністю поглинати випромінювання в ІЧ-ділянці спектра мають гази, молекули яких складаються із двох і більше атомів або іонів, за винятком кисню O_2 , азоту N_2 , водню H_2 . Одноатомні гази не поглинають ІЧ-радіацію.

Ступінь поглинання випромінювання кожним із газів змінюється в разі зміни довжини хвилі ІЧ-радіації, що падає на шар газу. Це обумовлює здійснення вибіркового аналізу газів.

Реалізують інфрачервоний метод аналізу двопробеневою апаратурою з вибірково працюючим приймачем випромінювання. За відсутності в газовій суміші аналізованого компонента дотримується рівність потоків інфрачервоного випромінювання, що надходять у приймач; за наявності в газовій суміші аналізованого компонента ця рівність порушується, що викликає відповідну реакцію чутливих елементів, установлених у приймачі. Сигнал непогодженості із приймача обробляється електронною схемою.

7.3.1.7. Плазменно-іонізаційний метод

Сутність методу полягає в тому, що введення молекул органічної речовини у водневе полум'я викликає утворення іонів, які під впливом електричного поля переміщуються між електродами, утворюючи іонний струм, пропорційний концентрації органічних речовин. На основі цього методу розроблено полум'яно-іонізаційний детектор (ПІД). Визначення концентрації вуглеводнів у повітрі за допомогою ПІД полягає у вимірюванні струму іонізації, що утворюється під час уведення в полум'я водню молекул органічних речовин.

7.3.1.8. Метод протонного збудження характеристичного рентгенівського випромінювання

Метод дозволяє визначати всі елементи з атомним номером, більшим за 8. Цей метод, як і рентгенофлюоресцентний, належить до неруйнувальних проб. Сутність його полягає в тому, що пучок іонів (протонів), прискорений у прискорювачі до енергії 2 – 4 МеВ і потім сфокусований в іонопроводі, потрапляє на фільтр із пробєю аерозолів і збуджує атоми елементів, що входять до їхнього складу. У разі спонтанного переходу збуджених атомів у стабільний стан виникає характеристичне рентгенівське випромінювання з досить простим енергетичним спектром, яке детектують напівпровідниковими детекторами. Спектри дешифрують за допомогою ЕОМ, яка видає результат у вигляді таблиць із концентрацією елементів, що визначають.

7.3.1.9. Плазмова емісійна спектроскопія

Одним із найсучасніших і найперспективніших методів атомного емісійного аналізу мікроелементів у повітрі є високочастотна індукційна плазмова спектроскопія (ВІП-спектроскопія). В основі методу лежить детектування спонтанного випромінювання термічно збуджених високочастотною плазмою атомів хімічних елементів. ВІП-спектрометри оснащують ЕОМ і джерелом високочастотної індукційної плазми. Ці прилади дозволяють одночасно визначати від 32 до 60 елементів.

7.3.1.10. Автоматичні засоби виявлення та вимірювання

Автоматичні засоби спостереження за рівнем забруднення атмосфери дозволяють оперативно визначати концентрацію, зокрема виявляти максимальні концентрації забруднювальних речовин. *Автоматичний газоаналізатор* становить прилад, у якому відбір проб повітря, визначення кількості контрольованого компонента, видавання та запис результатів аналізу виконуються автоматично за заданою програмою без участі оператора. В основу роботи автоматичних газоаналізаторів покладено різні фізико-хімічні методи аналізу: електрохімічний, інфрачервоний, люмінесцентний та ін.

7.3.2. Дистанційна хімічна розвідка

Щодо засобів хімічної розвідки поняття "дистанційна розвідка" означає здобування інформації про хімічні домішки без безпосереднього контакту. Усі відомі методи дистанційної розвідки можна розподілити на активні та пасивні.

До *активних* належить *метод лазерного зондування атмосфери*.

Лазерне зондування засновано на принципі оптичної локації та взаємодії зондувального випромінювання з досліджуваними хімічними домішками й реєстрації ефектів взаємодії. Лазерний локаційний пристрій дістав назву **лідар** (від англ. *Light Detection and Ranging*).

Серед *пасивних методів* дистанційної розвідки найбільш перспективними є *спектрорадіометричні*. **Радіометри** використовують принцип пасивної оптичної локації, із їхньою допомогою хімічні домішки виявляють за їхнім характерним тепловим випромінюванням.

ІЧ-спектрометри також виявляють речовини шляхом аналізу спектрального складу власного випромінювання або перевідбитого ним випромінювання природного джерела (Сонця).

7.3.3. Методи лазерного дистанційного зондування атмосфери

Під час лазерного зондування атмосфери через малу довжину хвилі оптичного випромінювання, особливо видимого й ультрафіолетового, відбивачами локаційного сигналу є всі молекулярні та аерозольні складові, тобто, насправді, сама атмосфера формує лідарний сигнал зі всієї траси зондування в будь-яких напрямках. Відстань до будь-якого розсіювального об'єму на трасі зондування однозначно визначають за часовим інтервалом між посиланням лазерного імпульсу та прийманням розсіяного назад сигналу. Інтенсивність прийнятого сигналу в кожен конкретний момент часу залежить як від властивостей відповідного розсіювального об'єму атмосфери, так і від характеристик усієї траси зондування на подвоєному шляху від лідара до розсіювального об'єму та назад.

Методи дистанційного лазерного зондування ґрунтуються на таких ефектах: релеївське; Мі-розсіювання; резонансне розсіювання; флюоресценція; поглинання, а також диференціальне поглинання та розсіювання (ДПР). Розгляньмо їх коротко.

7.3.3.1. Метод пружних розсіювань

Метод оцінювання хімічних домішок в атмосфері шляхом аналізу світлового випромінювання, розсіяного в результаті пружних взаємодій, містить релеївське – на атомах і молекулах – та Мі-розсіювання – на аерозолях (пил, водні краплі тощо), розміри частинок яких є значно більшими за довжину хвилі зондувального випромінювання. Частота розсіяного випромінювання в зазначених випадках дорівнює частоті сигналу лазера. Тому вимірювання за допомогою цих методів не забезпечують прямого здобування кількісної інформації щодо молекулярного складу атмосфери.

За допомогою методу пружного розсіювання дистанційно визначають уміст забруднювальних частинок в атмосфері шляхом оцінювання інтенсивності розсіяного назад випромінювання. На підставі визначених даних будують діаграми відносних концентрацій речовини частинок у просторі та їхні зміни в часі.

Зондування атмосфери здійснюють за допомогою імпульсного випромінювання лазерного локатора (лідара).

7.3.3.2. Метод комбінаційного розсіювання (КР)

В основу методу покладено ефект КР під час взаємодії зондувального випромінювання з досліджуваним середовищем. Сутність явища обумовлено специфічним обміном енергією між фотоном і розсіювальною молекулою. Наслідком його є зсув частоти розсіяного випромінювання, яке відрізняється від частоти того, що падає на значення, що відповідає можливим значенням внутрішньої коливально-обертальної енергії, яка є характерною для цієї молекули. Ідентифікацію забруднювачів атмосфери здійснюють за вмістом спектральних ліній КР у сигналах.

До переваг методу КР слід зарахувати високу інформативність, пов'язану з однозначною інтерпретацією результатів зондування, і зручність калібрування лідарів за природними стандартами.

7.3.3.3. Метод резонансного розсіяння (РР)

Ефект різкого збільшення випускання фотонів із частотою, що дорівнює частоті збудження в разі збігу довжини хвилі зондувального випромінювання з лінією поглинання, РР широко використовують у лідарах

для виявлення у верхніх шарах атмосфери (до 100 км) малих концентрацій елементів, наприклад, калію та натрію. Під час РР компоненти досліджуваних середовищ інтенсивно поглинають випромінювання лазера, коли частота потрапляє в ділянку смуги поглинання молекул та атомів цих компонентів. Через деякий час поглинена енергія випромінювання спонтанно перевипромінюється, а її частину, розсіяну у зворотному напрямку, детектують фотоприймачем.

Лідарні системи РР *будують на базі лазерів на барвниках*, ширина лінії випромінювання яких штучно звужується до 5 – 10 нм шляхом установлення в резонаторі лазера комбінації інтерферометра та дифракційної ґратки.

7.3.3.4. Метод резонансної флуоресценції (РФ)

Ефект РФ – двоступеневий, поглинається фотон із частотою f_1 , що випускається на частоті f_2 . Явище РФ, що спостерігають під час селективного поглинання зондувального лазерного випромінювання молекулами забруднювальних атмосферу речовин, може бути використано і для дистанційного виявлення. Вимірюючи довжину хвилі й інтенсивність випромінювання РФ, можна визначити типи забруднювальних домішок і їхні відносні концентрації.

Особливістю цього методу є необхідність у застосуванні лазера, що перебудовують у діапазоні довжин хвиль.

7.3.3.5. Методи резонансного поглинання (РП) і диференціального поглинання з розсіюванням (ДПР)

Метод РП засновано на явищі інтенсивного поглинання лазерного випромінювання в середовищі в разі збігу довжини хвилі випромінювання зі спектральними лініями поглинання атомів, які є складовими її молекул.

Смуги поглинання атмосферних газів містяться в широкому діапазоні довжин хвиль (від сантиметрового до вакуумного ультрафіолету). Для лазерної діагностики атмосфери методом РП використовують ділянку 0,25 – 10,0 мкм. В ІЧ-діапазоні поглинання обумовлено коливально-обертальними, а у видимій та УФ-ділянках – електронними переходами. Цей метод передбачає використання двох частот: однієї частоти в центрі лінії смуги поглинання цікавій для нас молекули, а другої – у її крилі.

Лідарний метод диференціального поглинання дозволяє здобувати інформацію про просторовий розподіл атмосферного газу *уздовж траси зондування*.

7.3.4. Пасивна дистанційна хімічна розвідка

Принцип дії приладів пасивної дистанційної хімічної розвідки засновано на прийманні власного теплого випромінювання хімічних домішок в атмосфері або перевідбитого ними сонячного випромінювання.

Є дві групи приладів дистанційної пасивної хімічної розвідки – *радіометри* та *спектрометри*.

Для дистанційного визначення хімічного складу гарячих викидів із димарів або вихлопних газів двигунів внутрішнього згоряння можна використовувати пасивний метод, що полягає в гетеродинному прийманні термічно збудженого на коливальних переходах випромінювання.

Вельми перспективним вважають метод багатозонального аеро-космічного знімання. Цей метод засновано на об'єктивно наявному стійкому кореляційному зв'язку між параметрами забруднення об'єктів природного середовища та характеристиками їхніх зображень, визначених шляхом енергетичних і поляризаційних вимірювань.

Спектрометри. Спектрометр як прилад пасивного дистанційного виявлення хімічного забруднення навколишнього середовища дозволяє забезпечити оперативний аналіз великої кількості різних хімічних домішок шляхом перебудови за частотою в заданому спектральному діапазоні.

Налаштування на довжини хвиль власних випромінювань термічно збуджених хімічних домішок в атмосфері здійснюють за допомогою спеціального пристрою – *монохроматора*.

Залежно від типу використовуваного монохроматора, розрізняють *спектрометри на дифракційних ґратках* і *клинових інтерференційних фільтрах*. Застосування в монохроматорі *здвоєної дифракційної ґратки* дозволяє розширити робочу ділянку спектра без зниження світлосили монохроматора. Монохроматор комплектують двома парами дифракційних ґраток.

Спектрометри на клинових інтерференційних фільтрах мають високу швидкодію, є компактними та економічними.

Контрольні запитання

1. Що розуміють під хімічної розвідкою?
2. Які основні завдання вирішує хімічна розвідка?
3. Яка апаратура належать до дистанційної хімічної розвідки?
4. Які принципи локації використовують в апаратурі дистанційної хімічної розвідки?
5. Що дозволяє визначити застосування приладів локальної дії та пристроїв пробовідбору?
6. Де можна встановлювати апаратуру хімічної розвідки?
7. Із застосуванням яких засобів здійснюють повітряну хімічну розвідку?
8. Із якою метою застосовують атомно-абсорбційні спектрофотометри?
9. У чому полягає контактна хімічна розвідка?
10. Які методи широко використовують для встановлення концентрації металів в атмосферних аерозолях?
11. Які методи широко використовують для визначення концентрації газоподібних речовин?
12. Як здійснюють спостереження за рівнем забруднення атмосферного повітря хімічними методами?
13. Які два типи рідинних поглинальних приладів найбільш широко застосують у хімічній розвідці?
14. На чому засновано спектрофотометричний метод аналізу речовини?
15. На чому засновано хроматографічний метод аналізу речовини?
16. У чому полягає принцип мас-спектрометрії?
17. Яке явище називають люмінесценцією?
18. Що покладено в основу методу високочастотної індукційної плазмової спектроскопії?
19. На яких ефектах ґрунтуються методи лазерного зондування?

8. Фізичні основи захисту від сейсмічної розвідки

Мета: розглянути основні поняття й походження сейсмічної розвідки; основні напрями, цілі, принципи та завдання сейсмічної розвідки; поняття й реалізації сейсмічного методу, сейсморозвідувального каналу;

особливості поширення хвиль у пружних середовищах; хвильові поля сейсмічних джерел.

Основні питання

8.1. Основні поняття.

8.2. Сейсмічні хвилі у твердих середовищах.

8.3. Основні особливості поширення хвиль у пружних середовищах.

8.4. Загасання сейсмічних хвиль.

8.5. Хвильові поля сейсмічних джерел.

8.6. Застосування спектрального аналізу для вивчення динамічних характеристик сейсмічних хвиль.

Ключові слова: сейсмічна розвідка; розвідувальна апаратура; сейсмічний метод; сейсморозвідувальний канал; хвилі у пружних середовищах; хвильові поля сейсмічних джерел.

Професійні компетентності:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

здатність розуміти основні напрями, цілі, фундаментальні принципи сейсмічної розвідки; фізичні основи захисту від сейсмічної розвідки з погляду захисту інформації.

Рекомендована література [1; 9; 12; 17].

8.1. Основні поняття

Під **сейсмічної розвідкою (СР)** розуміють здобування інформації шляхом виявлення й аналізу деформаційних і зсувних полів у земній поверхні, що виникають під впливом різних вибухів. *Основний напрям СР* – це розвідка ядерних вибухів і визначення їхніх параметрів.

СР визначає таке:

координати епіцентру вибуху;

потужність і час вибуху;

кількість вибухів у групі.

Сейсмічний метод виявлення та ідентифікації ядерних вибухів дістав загальне визнання як один з основних, крім виконуваних у космосі та повітрі на великих висотах (понад декілька десятків кілометрів).

Сейсмічний метод можна застосовувати для виявлення ядерних вибухів як на малих, так і великих епіцентральному відстанях, що сягають

16 000 – 17 000 км. Особливо ефективним є цей метод під час виявлення та ідентифікації підземних і підводних ядерних вибухів.

Для виявлення та ідентифікації *підземних вибухів*, виконуваних із повним камуфлетом, він поки є єдиним.

Під терміном *виявлення* розуміють установлення за сейсмічними даними факту й часу виникнення сейсмічного явища, координат епіцентру та визначення його енергії (або магнітуди).

Під терміном *ідентифікація* розуміють установлення за сукупністю характеристик зареєстрованих сейсмічних хвиль *явища*: землетрусу, підземного, підводного, контактного або повітряного ядерного вибуху.

Під час виявлення ядерних вибухів сейсмічним методом найбільш складним є виявлення та ідентифікація підземних.

На відміну від інших видів ядерних вибухів, у разі повністю прихованих – камуфлетних – підземних вибухах на великих епіцентральных відстанях не вдається здобути безперечних доказів – виявити радіоактивні продукти.

Сейсмічний метод нині є єдиним методом виявлення та ідентифікації.

Ідентифікацію здійснюють за сейсмічними записами, вона ґрунтується на відмінностях у динамічних характеристиках сейсмічних хвиль вибухів і землетрусів. Ці відмінності-критерії пов'язано з різним характером джерел сейсмічних коливань під час вибухів і землетрусів.

Сейсмічна розвідка є складною динамічною системою. У ній відбуваються процеси перетворення енергії та інформації, найважливішими з яких є такі:

порушення сейсмічним джерелом первинних хвиль;

поширення їх у геологічному середовищі з утворенням на неоднорідностях вторинних хвиль;

приймання і запис пружних коливань у точках спостереження;

оброблення та інтерпретація сейсмічних записів.

Цілеспрямовану послідовність цих процесів можна розглядати як **сейсморозвідувальний канал**, що перетворює вплив джерела пружних коливань (вхідний сигнал) на *сейсморозвідувальну інформацію* (вихідний сигнал).

Сейсморозвідувальний канал складається із трьох послідовно діючих систем.

Перша система – *сейсмогеологічний канал* – середовище, у якому формується та поширюється хвилеве поле пружних коливань.

Сейсмічне хвильове поле слугує вхідною інформацією для другої системи – *сейсмореєструвального каналу*, який містить сейсморозвідувальну техніку й методику, тобто інструмент дослідження.

На виході сейсмореєструвального каналу дістають *сейсмічні записи (сейсмограми)*, які є вхідною інформацією для третьої системи – сейсмообробного каналу, де сейсмограми перетворюються на результативний матеріал.

Сейсмообробний канал надає набір обробних процедур, що дозволяють здобути вихідну інформацію.

Вирішення завдань сейсмічної розвідки ґрунтується на вивченні хвильового поля, що виникає під час усіх видів вибухів, а також землетрусів. Досить ефективним методом у цьому разі є спектральний аналіз, який дозволяє виявити відмінності в характеристиках хвильових полів вибухів і землетрусів, а також полів микросейсмів (перешкод), і на цій основі здійснити селекцію інформаційних сигналів.

8.2. Сейсмічні хвилі у твердих середовищах

Основою сейсмічного методу розвідки є поширення пружних хвиль у товщі земної поверхні.

Джерелом виникнення пружних хвиль можуть бути такі: землетруси, різного роду вибухи та інші механічні дії в гірських породах.

Ці зовнішні сили впливають на гірські породи, прагнучи змінити їхні розміри та форму. Їм протистоять внутрішні зв'язки. Через їхню наявність тіло (гірська порода) прагне повернутися в початковий стан. Ця властивість гірських порід чинити опір змінам розмірів або форми й повертатися в початковий недеформований стан прийнято називати *пружністю*.

Мірою зміни форми й розмірів тіла слугує поняття *щодої деформації*.

Мірою впливу на гірські породи сейсмічних джерел прийнято називати *напругу* – силу, що діє на одиницю площі.

Кількісний зв'язок між напругою та виниклою деформацією встановлюють за *законом Гука*.

Якщо цей зв'язок є лінійним, то такі тіла прийнято вважати *абсолютно пружними*.

Якщо зв'язок між напругою й деформацією в тілі має більш складний, ніж лінійний вид залежності, то такі тіла називають *пластичними* або *неабсолютно пружними*.

У разі малих і короткочасних деформацій більшість гірських порід можна вважати *ідеально пружними*.

Процес поширення напруг (деформацій) у гірських породах від джерела прийнято називати *поширенням сейсмічних хвиль у середовищі*. Закони, що описують цей процес, визначають за відомими законами фізики про динамічну (рухомому) рівновагу елементів середовища.

Теорія поширення пружних хвиль показує, що в безмежному ізотропному просторі можуть виникати й поширюватися *два незалежні види сейсмічних хвиль*.

Перший вид сейсмічних хвиль називають *поздовжніми сейсмічними хвилями*. Їм надано індекс P , оскільки вони є найбільш швидкими та приходять від джерела до точки спостереження першими (V_p – швидкість поширення хвилі P).

Другий вид сейсмічних хвиль називають *поперечними, або S-хвилями*, оскільки їх на записах реєструють другими (V_s – швидкість поширення хвилі S) (рис. 8.1).

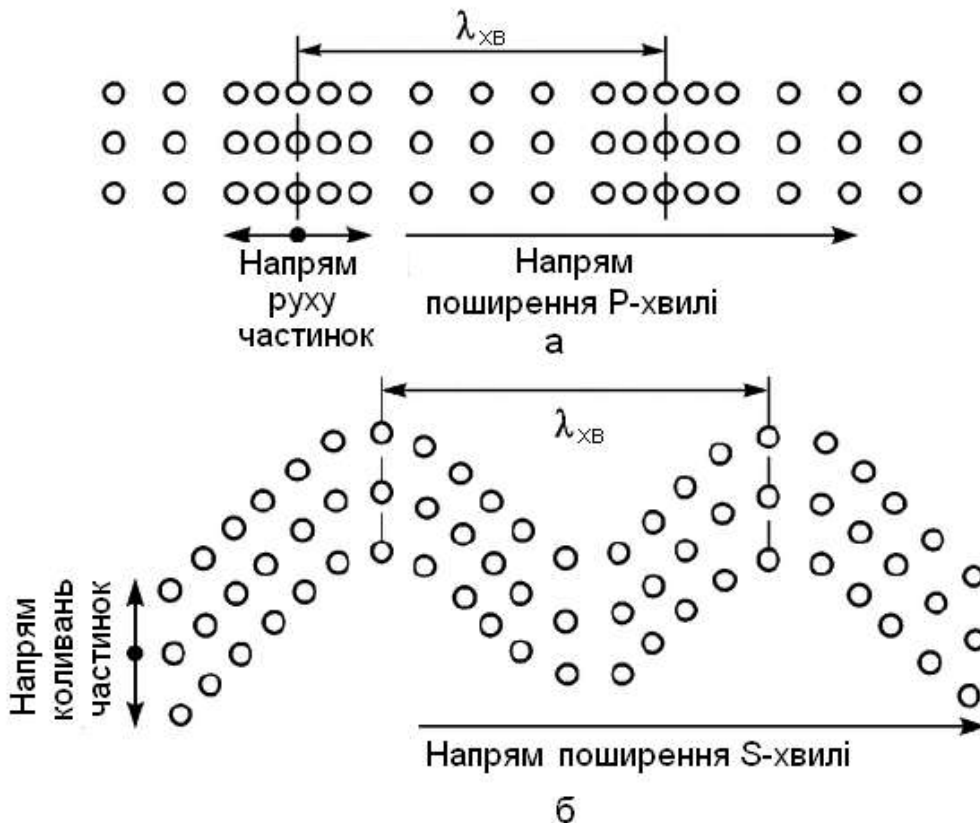


Рис. 8.1. Поширення пружних хвиль у безмежному ізотропному просторі:
а) напрям поширення P-хвилі; б) напрям поширення S-хвилі

Швидкості поширення цих типів хвиль різняться й характером зміщення точок середовища в момент проходження сейсмічних хвиль.

Поздовжні й поперечні хвилі спостерігають і у віддалених точках від джерела, захоплюючи весь об'єм середовища. Тому поздовжні й поперечні хвилі називають *об'ємними*.

У пружному безмежному середовищі можуть бути тільки об'ємні хвилі.

Швидкості поширення сейсмічних хвиль у пружному безмежному ізотропному середовищі визначають їхні пружні властивості.

Під час теоретичних досліджень пружні властивості середовища характеризують *пружними модулями Ламе* λ і μ та *густиною* ρ . Через ці компоненти *швидкості пружних хвиль визначають так:*

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (8.1)$$

Нерідко замість цих розглядають пов'язані з ними інші модулі, які зручні під час інженерних розрахунків:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \sigma)}}. \quad (8.2)$$

де E – модуль Юнга (модуль пружності);

σ – коефіцієнт Пуассона.

У *рідких середовищах* модуль пружності дорівнює нулю, а це означає, що й швидкість поширення поперечних хвиль дорівнює нулю (S-хвилі в рідких середовищах не поширюються). Зміни інтенсивності пружних хвиль під час їхнього поширення супроводжуються значною зміною форми їхніх коливань. Ці явища може бути пояснено, наприклад, переходом енергії сейсмічних хвиль в інші види. Середовища, у яких відбувається таке перетворення енергії пружних коливань, прийнято називати *поглинальними*. Усі наявні теорії, що пояснюють процес поглинання, указують, що амплітуда зміщення сейсмічної хвилі в поглинальному шарі має додатково послаблюватися, відповідно до залежності:

$$A_p(r) = A_p(r_0) \cdot e^{-\alpha_p(\omega)(r-r_0)}, \quad (8.3)$$

де $A_p(r)$ – амплітуда хвилі в розрахунковій точці;

$A_p(r_0)$ – амплітуда хвилі в опорній точці;

r_0 – відстань від джерела до опорної точки;

$r > r_0$ – відстань до цієї точки;

$\alpha_p(\omega)$ – амплітудний коефіцієнт поглинання, який визначає інтенсивність ослаблення коливань із відстанню.

Амплітудний коефіцієнт поглинання залежить від частоти. Різні теорії вказують на різні форми цієї залежності. У всіх випадках коефіцієнт поглинання $\alpha_p(\omega)$ є зростаючою функцією частоти. Це приводить до вибірного поглинання, відбувається послаблення високочастотних складових сейсмічного сигналу. Це стосується й поперечних хвиль. Властивості середовища у цьому разі треба описувати коефіцієнтом поглинання поперечних хвиль. Водночас у більшості гірських порід поглинання поперечних хвиль відбувається більш інтенсивно, ніж поздовжніх.

8.3. Особливості поширення хвиль у пружних середовищах

8.3.1. Основні поняття

У сучасній сейсморозвідці основне значення має дослідження розподілу швидкостей поширення пружних хвиль у товщі Землі. Для цього досить визначити час поширення фронтів пружних хвиль між різними точками середовища.

Питання, що стосуються часу поширення пружних хвиль, розглядають у *геометричній сейсміці*. Ця теорія, подібно геометричній оптиці, дозволяє встановити основні закони поширення фронтів хвиль і, зважаючи на загальні принципи Гюйґенса – Френеля або Ферма, вирішувати різні окремі завдання, що мають велике значення під час сейсморозвідки.

Згідно із *принципом Ферма*, форма сейсмічного променя має збігатися з формою траєкторії, уздовж якої час пробігу хвилі є екстремальним (мінімальним). На основі цього принципу здебільшого просто визначити форму сейсмічних променів. Дані про форму сейсмічних променів дозволять установити положення фронтів та інших кінематичних характеристик хвиль.

Відповідно до *принципу Гюйґенса*, далеко від джерел амплітуда коливання в точці спостереження є сумою коливань, створюваних елементарними (точковими) джерелами, розташованими на поверхні фронту.

Принцип Гюйґенса можна використовувати для визначення положення фронтів хвиль у середовищі для різних моментів часу.

Важливими характеристиками хвиль, що поширюються у пружних середовищах, є *ізохрони, промені, годограф, уявна швидкість*.

Щоб розрізнити положення фронту хвилі в різні моменти часу, вводять поняття про **ізохрони**, тобто поверхні, із якими фронт хвилі збігається в різні моменти часу. Сукупність ізохрон, що належать цій хвилі, називають *сімейством*.

Частину середовища, у кожній точці якої визначено час приходу хвилі, називають **полем часів**. Зображаючи сімейство ізохрон на кресленні, можна скласти уявлення про час пробігу хвилі до різних точок розглянутої частини середовища та вивчити поля часів цієї хвилі.

Поняття про ізохрони й поля часів використовують для інтерпретації матеріалів сейсмозвідки. Досліджуючи сімейство ізохрон, можна повністю описати особливості поширення фронту досліджуваної хвилі.

Іноді зручніше для вивчення поширення хвиль користуватися поняттям *променів* як зазвичай роблять у геометричній оптиці.

Променями називають такі криві (або прямі) лінії, які в кожній точці утворюють прямий кут з ізохронами. Промені становлять якби лінії, уздовж яких відбувається поширення хвилі. В однорідному середовищі промені є відрізками прямих ліній.

Ізохрони та промені, що йдуть від точкового джерела, може бути суміщено на одному кресленні. Такий графік називають **променевою діаграмою**. Променеві діаграми застосують під час інтерпретації сейсмічних спостережень.

Під час сейсмозвідувальних робіт безпосереднє вивчення коливань усередині середовища зазвичай є неможливим.

Сейсмічні спостереження зазвичай здійснюють уздовж прямих ліній, розташованих на поверхні Землі, і у їхніх різних точках *визначають час приходу хвилі*. Знаючи положення цих точок спостереження можна побудувати таблицю або графік, що виявляє залежність часу приходу хвилі від координат x і y у цих точок. Такий графік називають **годографом хвилі**.

Розрізняють *поверхневі й лінійні годографи*. У сейсмозвідці переважно користуються лінійним годографом.

Із поняттям годографа пов'язано поняття **уявної швидкості**. Вона становить швидкість руху сліду фронту хвилі вздовж лінії спостереження. Уявна швидкість зазвичай є більшою за реальну. Вона може дорівнювати їй тільки тоді, коли хвиля поширюється вздовж лінії спостереження. Якщо фронт хвилі є паралельним лінії спостереження, то уявна швидкість *стає нескінченно великою*.

Якщо хвиля поширюється вздовж лінії спостереження в напрямку прийнятого додатного відліку відстаней, то уявну швидкість *уважають додатною*. Інакше вона є *від'ємною*.

Значення уявної швидкості може бути визначено за годографом.

8.3.2. Пружні хвилі в середовищах, що містять межі розподілу

Сейсмічні межі – це поверхня довільного вигляду, по різні боки якої пружні властивості мають різні числові значення. Сейсмічні межі різняться між собою за ступенем різкості властивостей середовища по обидва боки від неї.

Особливе місце посідає межа, що збігається з поверхнею Землі. Через нехтувану малість (порівняно з гірськими породами) пружних властивостей повітря цю межу називають **вільною**. Вона відіграє особливу роль у формуванні поля пружних хвиль.

Пружні хвилі, порушені сейсмічним джерелом на поверхні однорідного пружного ізотропного півпростору із пружними модулями, було розглянуто Лембом і показано, що в такому середовищі разом із поздовжніми Р й поперечними S-хвилями виникає важливий тип сейсмічних хвиль – **поверхневі хвилі**. Характерною їхньою особливістю є швидке ослаблення створюваних коливань під час віддалення від межі.

Найбільше значення для сейсмозвідки має спостережувана на поверхні Землі **поверхнева хвиля Релея**. Вона характеризується такими особливостями:

1) хвиля має взаємно пов'язані деформації об'єму та зрушення. Зсув частинок відбувається як у вертикальному, так і горизонтальному напрямках;

2) хвиля Релея поширюється повільніше, ніж пряма поперечна хвиля S, яка переміщається тим самим шляхом, або пряма поздовжня хвиля Р;

3) із віддаленням від поверхні Землі вглиб середовища амплітуда коливань, пов'язаних із хвилею Релея, спочатку зростає, а потім складає;

4) видимі періоди коливань поверхневої хвилі є значно більшими за видимі періоди коливань, пов'язаних з об'ємними хвилями, викликаними тим самим вибухом;

5) спектр коливань поверхневих хвиль зміщений щодо спектра коливань об'ємних хвиль у бік низьких частот.

Уздовж межі двох твердих середовищ, густина і модулі пружності яких не сильно різняться, може поширюватися **поверхнева хвиля Стоунлі**, яка складається ніби із двох релеївських (по одній у кожному середовищі).

Фазова швидкість хвилі Стоунлі є меншою ніж фазові швидкості поздовжніх і поперечних хвиль в обох середовищах.

Іншим видом поверхневих хвиль, які спостерігають на вільній поверхні Землі, є **хвиля Лява** (поперечна поверхнева хвиля). Вона може виникати, коли під тонким шаром 1, що характеризується швидкістю поперечної хвилі, залягає шар 2 зі значенням швидкості поперечної хвилі в ньому.

Можна зробити такий висновок. Крім звичайних поздовжніх відбитих і заломлених хвиль, до поверхні ґрунту приходять такі:

пряма поздовжня хвиля, що поширюється вздовж поверхні Землі. У сейсморозвідувальній практиці прямою хвилею часто називають також заломлену, яка утворюється на поверхні корінних порід, що підстилають верхній вивітрений шар;

поверхневі хвилі, що поширюються також уздовж поверхні ґрунту з невеликою швидкістю (від 100 до 1 000 м/с);

мікросейсми, тобто безладні рухи ґрунту, що викликаються різними зовнішніми причинами;

багаторазово відбиті, відбито-заломлені й заломлено-відбиті хвилі, які відчутні взнаки як заломлені більш як один раз на різних межах;

дифраговані хвилі, що утворилися від різних поверхонь (скидів, насувань тощо), нерівностей сейсмічних меж, крутих вигинів меж;

поперечні й обмінні хвилі, що прийшли різними шляхами (*відбиті, заломлені та ін.*).

За наявності в геологічному розрізі *великої кількості сейсмічних меж* утворюється безліч різних хвиль. Ці хвилі інтерферують між собою й утворюють **нерегулярні хвилі** (нерегулярний фон перешкод вибуху).

8.4. Загасання сейсмічних хвиль

Велике значення під час ведення сейсмічної розвідки має загасання сейсмічних хвиль у середовищі поширення. Інтенсивність хвиль, які спостерігають на поверхні Землі, залежить від багатьох чинників. Найголовнішими з них є умови поширення.

Геологічні середовища, у яких поширюються сейсмічні хвилі, не є ні абсолютно пружними, ні однорідними. У них відбувається поглинання коливань, унаслідок тертя між частинками середовища. Це явище особливо позначається на високочастотних складових коливань, які швидко поглинаються та слабшають.

Унаслідок наявності в середовищі дрібних *неоднорідностей* (включень), порівнянних із довжиною хвилі, відбувається її **часткове розсіювання**, яке також призводить до зменшення загальної енергії, яку переносять хвилі.

Коефіцієнт поглинання характеризує поглинальні властивості середовища. Значення коефіцієнта поглинання в середовищі зростає зі збільшенням частоти коливань, що і призводить до вибірного поглинання короткохвильових складових усіх хвиль. У більшості геологічних середовищ коефіцієнт поглинання є прямо пропорційним частоті коливань.

Декремент поглинання визначає значення поглинання на шляху довжини хвилі.

8.5. Хвильові поля сейсмічних джерел

Сукупність коливань, що виникають у геологічному середовищі після впливу на неї сейсмічного джерела, утворює **первинне векторне хвильове поле**. Властивості й особливості векторного поля визначають за властивостями сейсмічного джерела та розподілом пружних властивостей у геологічному середовищі.

У разі поширення сейсмічних хвиль *далеко від джерела* у складному геологічному середовищі з великою кількістю меж утворюється безліч **вторинних хвиль**. Природа та структура вторинних хвиль сильно залежить від місця розташування ділянки, у якій вони поширюються.

Частотний склад коливань, порушуваних під час вибухів, більшою мірою залежить від літологічного складу та фізичного стану порід, у яких здійснюють вибух.

Усі види сейсмічних перешкод мікросейсм можна умовно розподілити на дві категорії: когерентні й некогерентні.

Когерентними називають перешкоди, які простежують принаймні на кількох сусідніх трасах і мають схожі форми запису.

Некогерентними називають перешкоди (шуми) у записах, вигляд яких випадковим чином змінюється від точки до точки (від траси до траси) і не може бути передбаченим.

Когерентні розподіляють на такі перешкоди:

- а) енергія яких поширюється, головним чином, горизонтально;
- б) енергія яких підходить до сейсмоприймачів за напрямками, близькими до вертикального.

Когерентні перешкоди містять поверхневі хвилі; відбиті та відбито-заломлені від приповерхневих структур; заломлені хвилі, що утворилися на високошвидкісних приповерхневих шарах; перешкоди від руху транспорту тощо.

Некогерентний шум є просторово випадковим і має властивості повторюваності на записах. Його обумовлено розсіюванням на неоднорідностях і приповерхневих шарах розрізу. Джерела такого шуму є малими й розташованими так близько до сейсмоприймачів, що вхідні сигнали на кожному каналі є різними.

Випадковий повторюваний шум обумовлено зазвичай вітром, рухом крон дерев тощо.

Для створення ефективних прийомів боротьби з перешкодами та з іншими цілями важливо мати уявлення про форму корисного сигналу – **сейсмічного імпульсу**. Водночас найбільш важливим є правильно визначити момент приходу хвилі в задану точку середовища.

Для математичного опису форми сейсмічних імпульсів у практиці сейсмічної розвідки застосовують цілий ряд формул. Найбільш широко використовують формули, запропоновані Ріккером, Берлаге та Пузирьовим.

Принципово всі сейсмічні імпульси розподіляють на два види: мінімально-фазові та нуль-фазові.

Мінімально-фазові імпульси характеризуються тим, що основну частину енергії спочатку зосереджено в початковій фазі, а перший екстремум коливань близький до початку імпульсу (імпульс Берлаге).

Нуль-фазові імпульси симетричні щодо основного екстремуму, а час його реєстрації відповідає часу вступу хвилі (імпульси Ріккера, Пузирьова).

Сейсмореєструвальний канал. Залежно від застосовуваного носія розрізняють сейсмореєструвальні канали з *відтвореною* (проміжною) і *невідтвореною* реєстрацією.

Сейсмореєструвальним каналом є сукупність послідовно з'єднаних апаратів, які здійснюють приймання механічних коливань ґрунту, їхнє перетворення на електричні коливання, посилення та запис на носій.

Як носій запису використовують світлочутливий папір і плівку, магнітну стрічку, електрохімічний папір тощо.

Склад і властивості апаратів у каналі залежать, крім конструктивних особливостей, від застосовуваного виду реєстрації.

Невідтворувальна реєстрація виключає можливість застосування апаратних засобів виділення корисних коливань під час оброблення. Тому сейсмореєструвальний канал має містити пристрої, що дозволяють виділяти корисні коливання. Канал складається із *сейсмоприймача (СП)*, *підсилювача (П)*, *фільтрів (Ф)* і *реєструвального пристрою*.

Під час *відтвореної* реєстрації коливання записують на магнітну стрічку, до якої їх може бути відтворено у вигляді електричних коливань та оброблено.

Сейсмореєструвальний канал має відповідати певним вимогам, що залежать від особливостей хвильового поля, а саме:

сейсмореєструвальний канал має бути лінійною системою, властивості якої описують її тимчасовою характеристикою;

частотні характеристики сейсмоприймача СП і реєструвальних пристроїв мають забезпечувати пропускання коливань у широкому діапазоні частот, що містить основну частину спектра корисних коливань;

для видобування більшого обсягу корисної інформації коливання хвиль після реєстрації й апаратного оброблення має бути перетворено так, щоб серед них у виразній формі було подано корисні хвилі.

Поділ коливань, обумовлених різними напрямками вектора зрушення у просторі, здійснюють за допомогою сейсмоприймачів, що мають різне орієнтування їхніх осей чутливості у просторі.

Поділ коливань із різними спектральним складом реалізують, головним чином, електричними фільтрами. Поділ хвиль із різною уявною довжиною хвилі здійснюють інтерференційними системами.

Основним елементом сейсмореєструвального каналу є сейсмоприймач.

Сейсмоприймач є першою ланкою сейсмореєструвального каналу та становить апарат, що сприймає механічні коливання ґрунту та перетворює їх на електричні сигнали.

Сейсмоприймач складається з механічної та електричної частин.

Найбільше застосують приймачі, у яких використовують *інерційний принцип вимірювання механічного руху*.

Є також *сейсмоприймачі тиску*, які сприймають зміни тиску, що відбуваються під час поширення пружної хвилі.

8.6. Застосування спектрального аналізу для вивчення динамічних характеристик сейсмічних хвиль

Для вивчення динамічних характеристик сейсмічних хвиль може бути використано **амплітудні** або **енергетичні спектри** як окремих хвиль, так і всі записи коливань на сейсмограмі.

За допомогою спектрального аналізу може бути, наприклад, *вирішено* такі завдання:

1) вивчення спектрального складу корисних сигналів – сейсмічних хвиль і перешкод – мікросейсм. Знання спектрів корисного сигналу й перешкод дозволяє поліпшити умови реєстрації корисних хвиль:

а) вибрати оптимальні параметри апаратури для обчислення найбільшого відношення амплітуди корисного сигналу до амплітуди перешкод;

б) вибрати оптимальні параметри групи сейсмографів, із метою селекції коливань як за частотною ознакою, так і за спрямованістю або швидкісними характеристиками;

2) визначення основних параметрів спектрів корисного сигналу (ширини смуги спектра та крутизни спаду його схилів, співвідношення амплітуд різних спектральних складових, так званих спектральних коефіцієнтів). Знання зазначених параметрів спектра необхідно, наприклад, під час селекції корисних сигналів у точці спостереження за спектральними характеристиками;

3) визначення спектрів простих хвиль, що становлять інтерференційне коливання, за спектром інтерференційної хвилі за умови відмінності в переважних періодах спектрів простих хвиль;

4) визначення спектрів корисних сигналів, зареєстрованих широко-смуговою апаратурою на фоні інтенсивних перешкод, що можливо за умови відмінності в переважних періодах корисного сигналу та перешкод;

5) ідентифікація сейсмічних хвиль різних типів – поздовжніх, поперечних, поверхневих – за їхніми спектрами;

6) розрізнення за спектрами записів вибухів і схожих на них землетрусів, що відбуваються в одному районі й реєстрованих мережею тих самих станцій. Для цього використовують відношення спектрів поздовжніх, поперечних і поверхневих хвиль або спектрів усього запису коливань. Це ґрунтується на відмінності в механізмі діючих сил у джерелі, зокрема різних тривалостей дії джерела та його розмірів;

7) вивчення спектрів основного поштовху землетрусу й подальших афтершоків, із метою їхньої ідентифікації;

8) оцінювання поглинальних властивостей середовища в діапазоні періодів і визначення залежності коефіцієнта поглинання від частоти. Знання цих залежностей дозволяє оцінити амплітуди коливань у хвилях на записах фільтрувальної за частотною ознакою апаратури. Визначення коефіцієнтів поглинання сейсмічних коливань у хвилях і їхньої залежності від частоти важливо для вивчення властивостей земної кори, її мантиї та ядра;

9) побудова спектральних калібрувальних кривих для енергетичної класифікації землетрусів і вибухів.

Крім перелічених завдань, спектральні методи застосовні для вирішення інших загальносейсмічних і спеціальних, наприклад, визначення відносин потужності вибухів та ін.

Контрольні запитання

1. Що розуміють під сейсмічною розвідкою?
2. Із якою метою можна застосовувати сейсмічний метод?
3. Як здійснюють ідентифікацію ядерних вибухів і на чому вона ґрунтується?
4. Що таке "сейсморозвідувальний канал"?
5. На чому ґрунтується вирішення завдань сейсмічної розвідки?
6. Що може бути джерелом виникнення пружних хвиль?
7. За яким законом установлюють кількісний зв'язок між напругою та виниклою деформацією в середовищі?
8. Чому дорівнює модуль пружності в рідких середовищах?

9. У якому розділі сучасної науки розглядають питання, що стосуються часу поширення пружних хвиль у середовищах?
10. Що називають сейсмічними межами?
11. Які властивості середовища характеризує коефіцієнт поглинання?
12. Що таке "первинне векторне хвильове поле"?
13. Що становить сейсмореєструвальний канал?
14. Які спектри може бути використано для вивчення динамічних характеристик сейсмічних хвиль?
15. Які завдання можуть бути вирішено за допомогою спектрального аналізу?
16. Яку характеристику називають уявною швидкістю?
17. Яким певним вимогам, що залежать від особливостей хвильового поля, має відповідати сейсмореєструвальний канал?

9. Фізичні основи захисту від магнітометричної розвідки

Мета: розглянути основні поняття й походження магнітометричної розвідки; основні напрями, цілі, принципи, завдання методи, прилади магнітометричної розвідки; основні характеристики магнітного поля; земний магнетизм і його елементи.

Основні питання

- 9.1. Основні поняття.
- 9.2. Земний магнетизм і його елементи.
- 9.3. Методи вимірювань елементів земного магнетизму й апаратура магнітометричної розвідки.

Ключові слова: магнітометрична розвідка; розвідувальна апаратура; класифікація магнітометричної розвідки; характеристики магнітного поля; технічні засоби магнітометричної розвідки; земний магнетизм.

Професійні компетентності:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

здатність розуміти основні напрями, цілі, фундаментальні принципи магнітометричної розвідки; фізичні основи захисту від магнітометричної розвідки з погляду захисту інформації.

Рекомендована література [1; 9; 12; 17].

9.1. Основні поняття

Під **магнітометричною розвідкою (ММР)** розуміють здобування інформації шляхом виявлення й аналізу локальних змін магнітного поля Землі під впливом об'єктів із великою магнітною масою.

ММР вирішує такі завдання:

виявлення та визначення об'єктів, розміщених на поверхні й під поверхнею Землі та водному середовищі;

визначення "магнітних портретів" об'єктів і складення їхньої класифікації.

Оскільки основним джерелом інформації для засобів ММР є **локальні зміни магнітного поля Землі**, доцільно попередньо розглянути деякі загальні положення.

Основні характеристики магнітного поля. **Магнітним полем** називають форму матерії, яка відрізняється такою важливою властивістю – що це поле діє на рухому заряджену частинку із силою, яка залежить від добутку її заряду на швидкість.

Як *силову характеристику магнітного поля* використовують поняття напруженості. **Напруженістю** \vec{H} магнітного поля називають векторну фізичну величину, що характеризує магнітне поле, створене рухомими зарядами та струмами й не залежить від магнітних властивостей середовища.

У реальних умовах магнітне поле поширюється в матеріальному середовищі, яка цим полем намагнічується. Водночас різні середовища пропускають через себе магнітне поле по-різному, Цю особливість називають **магнітною проникністю** μ середовища, речовини.

Густина магнітного потоку в намагніченому матеріалі визначають як вектор **магнітної індукції** \vec{B} . Магнітна індукція також є силовою характеристикою магнітного поля в матеріальному середовищі. Магнітну індукцію пов'язано з напруженістю магнітного поля таким співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (9.1)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму;

\vec{H} – напруженість магнітного поля.

Величину, що характеризує зв'язок намагніченості речовини з магнітним полем у ньому, називають **магнітною сприйнятливістю** χ . Магнітну

сприйнятливості пов'язано з магнітною проникністю в СІ таким співвідношенням: $\mu = 1 + \epsilon$. Магнітна сприйнятливості є важливою характеристикою, відповідно до якої всі речовини розподіляють на *діа-*, *пара-* і *феромагнетики*.

Діамагнетики мають негативну сприйнятливості й тому вони намагнічуються проти поля; **парамагнетики** та **феромагнетики**, маючи позитивну сприйнятливості, намагнічуються за полем.

Магнітна сприйнятливості діамагнетиків і парамагнетиків є низькою, вона слабо залежить від \vec{H} і то лише в ділянці дуже сильних полів і низьких температур. Вона досягає особливо великих значень у феромагнетиках (від декількох десятків до багатьох тисяч одиниць), причому дуже значно і складним чином залежить від \vec{H} .

Під впливом магнітного поля напруженістю \vec{H} речовина намагнічується, що характеризується величиною \vec{J} , яку називають **інтенсивністю намагнічування** $\vec{J} = \epsilon \vec{H}$. Цю намагніченість вважають наведеною (індукованою), оскільки її створено полем \vec{H} .

Вектор \vec{J} називають також **магнітним моментом одиниці об'єму речовини**. Тоді для об'єкта об'єм V добуток $\vec{J}V = \vec{M}$ визначає магнітний момент усього об'єму.

Напруженість магнітного поля розглядають у фізиці як допоміжну величину, але у ММР саме напруженість вважають основною характеристикою магнітного поля.

У СІ одиницею напруженості магнітного поля є ампер/метр (А/м). Таку саму розмірність має і вектор \vec{J} .

У магніторозвідці вимірювання поля найчастіше здійснюють у повітрі, іноді – у воді. Повітря та вода є дуже слабوماгнітними середовищами. Так, для повітря $\mu = 1,000\ 000\ 1$.

На практиці приймають для повітря $\mu = 1$ ($\epsilon = 0$). У цьому разі зв'язок між \vec{B} і \vec{H} спрощено: $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, або $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \cdot 10^9 = 1257\ \text{H}$, де \vec{B} вимірюють у нТл, а \vec{H} – в А/м.

9.2. Земний магнетизм і його елементи

Магнітне поле Землі – це простір, у якому діють магнітні сили, пов'язані з намагніченістю Землі загалом. У першому наближенні магнітне поле Землі можна розглядати як *поле кулі*, намагніченої по осі, розташо-

ваної під кутом $11,5^\circ$ до осі її обертання. Магнітний момент Землі дорівнює $8,3 \cdot 10^{25}$ од. СГСМ. Магнітне поле Землі характеризується напруженістю, що є векторною величиною, яку позначають у ММР як \vec{T} , а в теорії геомагнетизму – \vec{H}_T . У ММР вектор \vec{T} безпосередньо не вимірюють. Визначають *числове значення (модуль) цього вектора* $T = |\vec{T}|$ або збільшення числового значення вектора $\Delta T = |\Delta \vec{T}|$. У проміжках часу, коротких порівняно із планетарними історичними епохами, магнітне поле Землі можна розглядати як постійне.

Вектор напруженості геомагнітного поля може бути розкладено на складові (рис. 9.1). Використовують прямокутну систему координат із центром у точці вимірювання. Площину xOy приймають горизонтальною, вісь x – спрямованою на географічний північ, y – на схід, z – по вертикалі вниз.

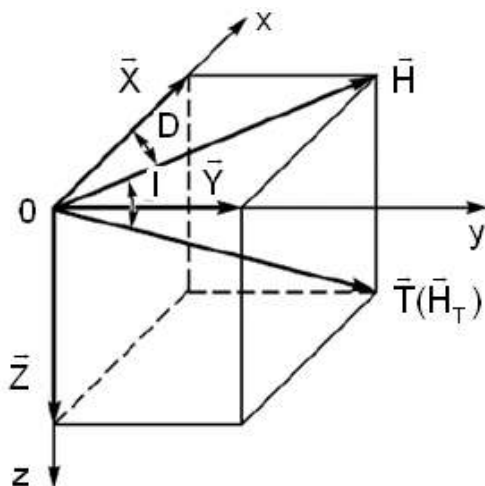


Рис. 9.1. Вектор напруженості геомагнітного поля, розкладений на складові

Складові вектора \vec{T} по осях позначають $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$. Проекцію повного вектора напруженості поля \vec{T} на горизонтальну площину називають **горизонтальною складовою** $\vec{H} = \vec{X} + \vec{Y}$.

Вертикальну площину Oz , у якій лежать вектори \vec{H} і \vec{T} , називають **площиною магнітного меридіана**. Положення магнітного меридіана використовують для визначення **магнітного азимута** будь-якого напрямку. Вимірювання здійснюють за *годинниковою стрілкою від напрямку магнітного меридіана*.

Кут D між площинами географічного й магнітного меридіанів називають **кутом магнітного відхилення**.

Кут I між вектором повної сили \vec{T} і горизонтальною площиною xOy називають **кутом магнітного нахилення**.

Відхилення D , нахилення I , горизонтальну H , вертикальну Z , північну X і східну Y складові називають **елементами земного магнетизму**. Елементи H , Z , X , Y вимірюють в ерстедах (у СГСМ) і гамах; D , I – у градусах.

Значення та стан вектора \vec{T} у цій точці простору залежать від трьох величин, найбільш поширеними є поєднання яких:

$$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z};$$

$$\vec{X}, \vec{Z}, \vec{D} \text{ або } \vec{X}, \vec{Z}, I;$$

$$\vec{D}, I, \vec{Z} \text{ або } \vec{D}, I, \vec{H}.$$

Під час вивчення розподілу напруженості геомагнітного поля на земній поверхні вимірюють \vec{D}, I, \vec{H} , оскільки знання зазначених величин досить для обчислення всіх складових по координатних осях і повного вектора \vec{T} :

$$\vec{X} = \vec{H} \cos Z, \vec{Y} = \vec{H} \sin D, \vec{Z} = \vec{H} \operatorname{tg} I. \quad (9.2)$$

У магнітній розвідці використовують зазвичай величини ΔZ , ΔT , T ; рідше \vec{H} , ΔH ; іноді \vec{T} .

9.3. Методи вимірювань елементів земного магнетизму й апаратура магнітометричної розвідки

У ММР як запобіжні, із якими порівнюють досліджуване геомагнітне поле, використовують поля постійних магнітів або електричного струму (оптико-механічні магнітометри й індукційні магнітометричні прилади, ферозонди).

Більш сучасні магнітометри – **протонні** та **квантові** – засновано в першому випадку на *взаємодії протонів із геомагнітним полем*, у другому – використовують *ефект Зеемана*, що виявляє взаємодію вимірюваного магнітного поля з атомами робочої речовини, які мають магнітний момент.

Оптико-механічний магнітометр (ОММ) типу магнітних ваг має магніточутливий елемент у вигляді постійного магніту, закріпленого на каркасі, або металевої нитки (стрічки) з одним ступенем свободи.

Магнітометри на нитках (стрічках) називають **торсіонними**. *Магнітні ваги* – це постійний магніт, що вільно обертається у вертикальній площині навколо горизонтальної осі. Магнітні ваги дозволяють виміряти приріст вертикальної або горизонтальної складової напруженості магнітного поля.

Принцип вимірювання магнітними вагами засновано на зрівноважуванні моменту обертання, викликаного дією магнітного поля Землі, моментом сили тяжіння або кручення нитки, на якій закріплено магніт.

У разі майже горизонтального розташування магніту найбільший момент обертання викликає вертикальна складова, тому такі ваги називають **вертикальними**.

Їх використовують для вимірювання вертикальної складової напруженості поля.

У разі майже вертикального розташування магнітні ваги є найбільш чутливими до зміни горизонтальної складової, у зв'язку із цим їх називають **горизонтальними**.

Такі ваги застосовують для вимірювання горизонтальної складової напруженості поля.

Зміна кута нахилу магніту слугує мірою напруженості магнітного поля.

9.3.1. Протонні (ядерні) магнітометри

Елементарні частинки матерії, зокрема атомні ядра, крім заряду й маси, характеризуються власним моментом (спіном) \vec{L} і власним магнітним моментом $\vec{\mu}$. Останній дозволяє розглядати протон як елементарний магніт, здатний взаємодіяти із зовнішнім магнітним полем.

Магнітний $\vec{\mu}$ механічний \vec{L} моменти протона взаємопов'язані й окремо не існують. Їхні вектори мають однаковий напрямок. Відношення магнітного моменту до механічного (*гіромагнітне відношення*) $V = \vec{\mu} / \vec{L}$ також є *атомною константою, яка не залежить від зовнішніх чинників*.

Під час накладення постійного магнітного поля атомні ядра, будучи носіями магнетизму, починають прецесіювати (обертатися) відносно

напрямку прикладеного поля із частотою, яку визначають за формулою Лармора:

$$f = (V / 2\pi)H, \quad (9.3)$$

де f – частота прецесії ядра, Гц;

V – гіромагнітне відношення;

H – напруженість зовнішнього магнітного поля.

Оскільки гіромагнітне відношення є константою, частоту прецесії ядра будуть визначати тільки за напруженістю прикладеного поля. Отже, вимірюючи частоту прецесії, можна визначити напруженість зовнішнього магнітного поля. Це явище покладено в основу принципу дії протонних (ядерних) магнітометрів.

Магнітометри, засновані на принципі протонної прецесії, належать до розряду **модульних**. Вони дозволяють виміряти *тільки модуль* повного вектора напруженості \vec{T} магнітного поля Землі. Розглянутий принцип виключає вимірювання будь-яких компонент цього вектора.

Цикл роботи магнітометра складається із двох частин: збудження прецесії та подальшого вимірювання частоти, за якою і обчислюють значення зовнішнього поля.

Збудження прецесії містить три елементи: поляризацію, фазування та синхронність.

Залежно від способу збудження розрізняють два різновиди протонних магнітометрів: зі статичною та динамічною поляризацією.

9.3.2. Протонні магнітометри зі статичної поляризацією

Магніточутливий перетворювач (датчик) протонного магнітометра є посудиною (зазвичай циліндричної форми) із робочою речовиною, охоплений багатовитковою обмоткою.

Склад робочої речовини визначають способом поляризації. У магнітометрах зі статичної поляризацією робоча речовина становить рідину, яка містить протони (дистильовану воду, гас).

Поляризацію здійснюють, із метою надання магнітним моментам протонів однакової орієнтації. Погоджене розташування елементарних

магнітних моментів протонів у поляризованій робочій речовині створює сумарний магнітний момент – *макроректор* \vec{M} . У разі вимкнення поляризувального поля $\vec{T}_{\text{пол}}$ протони виявляють тільки під впливом вимірюваного геомагнітного поля й синхронно починають процесувати навколо його вектора \vec{T} . Це означає одночасно й прецесію макроректора \vec{M} . У разі вимкнення поляризувального поля котушка датчика підключається до вимірювального тракту для вимірювання зовнішнього поля.

9.3.3. Протонні магнітометри з динамічною поляризацією ядер (ДПЯ)

У магнітометрів із ДПЯ використовують більш складну робочу речовину. Вона становить розчин, у якому наявні два типи вільних носіїв елементарного магнетизму – протони й електрони. Відповідно, є сукупність протонних $\vec{\mu}_p$ та електронних $\vec{\mu}_e$ магнітних взаємодійних моментів, що впливають один на одного.

Протонні магнітометри із ДПЯ відрізняються від приладів зі статичним режимом тільки способом поляризації та конструкцією.

9.3.4. Квантові магнітометри

В основі принципу дії квантових магнітометрів покладено ефект Зеемана, який виявляє взаємодію вимірюваного магнітного поля з робочою речовиною магнітометра. У квантових приладах як робочу використовують речовину, атоми якої мають магнітний момент. До таких речовин, які застосовують у світовій практиці приладобудування, належать цезій, рубідій (пари цих металів), гелій. Тому за складом робочої речовини магнітометри іноді називають *цезієвими, рубідієвими, гелієвими*. Є й ще одна загальна назва магнітометрів цього типу – *квантово-оптичні, або магнітометри з оптичним накачуванням*.

Відомо із квантової фізики, що енергетичні рівні атомів рідких, газоподібних і пароподібних речовин, що містяться в магнітному полі, розщеплюються на кілька підрівнів, що під час спектроскопічного випромінювання виявляють у виникненні додаткових спектральних ліній. Це явище має назву *ефекта Зеемана*.

Залежно від того, уздовж магнітного поля або перпендикулярно йому буде спостережуваний ефект Зеємана, розрізняють *поздовжній (Z-ефект)* або *поперечний (X-ефект)*. Зазначені явища трохи різні.

Ефект Зеємана в сильному магнітному полі називають *нормальним*, у слабкому – *аномальним*.

Ефект Зеємана використовують у квантових магнітометрах з оптичним накачуванням атомів. Вимірвальний цикл містить дві частини: оптичне накачування, а потім вимірювання резонансної частоти та визначення значення поля.

Друга особливість – зеєманівське розщеплення виникає як результат впливу на атоми робочої речовини повного вектора індукції магнітного поля. Тому квантовий магнітометр вимірює *модуль повного вектора індукції*. Вимірювання будь-яких складових згаданого вектора в цьому разі є неможливим.

9.3.5. Ферозондові магнітометри

Свою назву ці прилади дістали від чутливого елемента оригінальної конструкції *ферозонда*. За допомогою ферозонда магнітне поле вимірюють шляхом визначення потоку магнітної індукції, створеного полем.

Чутливість вимірювача до досліджуваного поля становить важливу характеристику приладу. Її вимірюють значенням сигналу на одиницю вимірюваного поля. У ферозондах мірою досліджуваного поля є амплітуда ЕРС на виході ферозонда. Тому його чутливість визначають кількістю мілівольт на 1 нТл.

Іншою важливою характеристикою магнітометра є *стабільність його роботи*. Її визначають постійністю його показань в одному й тому самому полі або наявністю помилкового сигналу за відсутності вимірюваного поля. Характеристикою стабільності слугує *сталість* або, навпаки, *сповзання нуля*.

Зазвичай ферозонди *застосовують* для вимірювання збільшень складових геомагнітного поля, наприклад ΔZ , ΔH або ΔT . *Вимірювання повних значень також є можливим*, проте супроводжується значним зростанням похибок. Вимірювання збільшень дозволяє визначити, на скільки магнітне поле в черговій точці спостережень відрізняється від поля в початковій точці або від початкового поля.

Нині у вітчизняній практиці ферозондові магнітометри застосовують лише для підземних вимірювань магнітного поля – у свердловинах і шахтах.

9.3.6. Узагальнені дані з порогової чутливості магнітометрів

Як уже зазначалося, відомі нині методи вимірювання магнітного поля засновано на взаємодії цього поля з:

постійними магнітами (оптико-механічні магнітометри);

магнітними моментами атомних ядер (протонні магнітометри);

магнітними моментами атомів (квантові магнітометри);

спіновими магнітними моментами під час намагнічування магнітних матеріалів (ферозондові магнітометри);

рухомими електричними зарядами (магнітометри на ефекті Голла);

обертливими електричними котушками або рамками зі струмом (індукційні магнітометри);

надпровідними системами за наднизьких температур (кріогенні магнітометри).

Перелічені магнітометри мають таку *порогову чутливість*:

оптико-механічні магнітометри – 5 нТл;

протонні магнітометри – 2 нТл;

квантові магнітометри – $2 \cdot 10^{-2}$ нТл;

ферозондові магнітометри – 0,2 – 2 нТл;

індукційні магнітометри – 10^{-3} нТл;

магнітометри на ефекті Голла – 30 нТл;

кріогенні магнітометри – 0,1 нТл.

9.3.7. Закордонна апаратура ММР

Сучасні магнітні визначники, що є на озброєнні армій США, Великої Британії, Франції та інших держав, мають чутливість близько 0,01 нТл, що дозволяє виявляти підводні човни на відстані до 900 м.

Магнітні визначники можна ефективно використовувати в умовах протидії гідроакустичним засобам розвідки.

Основним їхнім *недоліком* є схильність до перешкод від місцевих магнітних полів (власного поля носія, районів магнітних аномалій тощо), у зв'язку із чим ефективність дії магнітних визначників значно знижується під час використання в районах магнітних аномалій, мілководних районах і північних широтах.

Найбільшу ефективність визначники досягають під час польотів повітряних носіїв апаратури вдень на висотах близько 30 м, а вночі – близько 90 м.

Усі протичовнові літаки США оснащені магнітними визначниками типу AM / ASQ-10 із дальністю дії до 300 м, а також AN / ASQ-81 із більшою високою чутливістю (0,16 нТл) і дальністю дії до 1 000 м. Цими засобами оснащують протичовнові літаки P-3C, S-3A та протичовнові гелікоптери SH-2D(F); SH-3 BMC США.

Літак "Атлантик" оснащено французьким магнітним визначником DNAX-1 із дальністю дії до 300 м.

Наземна апаратура MMP має чутливість 0,1 нТл і дозволяє розрізняти зразки військової техніки на відстані до 50 м.

У США використовують наземний прилад MMP типу REWD, магнітні датчики якого дозволяють виявляти й ідентифікувати проходження техніки та людей на відстанях понад 15 м. Сигнали, які надходять на датчик, передають радіоканалом на відстань до декількох кілометрів.

Один з важливих напрямів удосконалення засобів MMP – це створення приладів виявлення й розпізнавання зразків військової техніки, підземних військово-промислових об'єктів і складів.

Проведені у світі експерименти показали принципову можливість виявлення військової техніки з висоти 50 – 75 м, підземних парків і споруд – до 80 м, підземних заводів і електростанцій – до 200 м, підземних складів – до 100 м.

Основними напрямками розвитку та вдосконалення апаратури MMP на найближчий час є такі:

створення високочутливих магнітометрів із компенсацією магнітних полів носіїв варіацій магнітного поля Землі;

розроблення градієнтометричних систем із малими базами;

використання для оброблення інформації обчислювальної техніки, для визначення типів підводних об'єктів із низьким рівнем власного магнітного поля;

використання низькочастотних складових електромагнітного поля об'єкта в діапазоні частот 1 – 5 000 Гц.

Контрольні запитання

1. Що розуміють під магнітометричною розвідкою?
2. Які завдання вирішує магнітометрична розвідка?

3. Що називають магнітним полем?
4. Яке поняття використовують як силову характеристику магнітного поля?
5. Як називають величину, що характеризує зв'язок намагніченості речовини з магнітним полем у ньому?
6. Який вектор називають магнітним моментом одиниці об'єму речовини?
7. Як у першому наближенні під час розрахунків розглядають магнітне поле Землі?
8. На які складові може бути розкладено вектор напруженості геомагнітного поля?
9. Яку площину називають площиною магнітного меридіана?
10. Який кут називають кутом магнітного відхилення?
11. Який кут називають кутом магнітного нахилення?
12. Які складові називають елементами земного магнетизму?
13. Який ефект покладено в основі принципу дії квантових магнітометрів?
14. До якого розряду належать магнітометри, засновані на принципі протонної прецесії?

10. Фізичні основи захисту від комп'ютерної розвідки

Мета: розглянути основні поняття й походження комп'ютерної розвідки; основні напрями, цілі, принципи та завдання комп'ютерної розвідки; комп'ютерну розвідку з погляду захисту інформації.

Основні питання

- 10.1. Основні поняття.
- 10.2. Особливості комп'ютерної розвідки.
- 10.3. АСОД та основні способи несанкціонованого доступу.
- 10.4. Використання програмних закладок і комп'ютерних вірусів.

Ключові слова: комп'ютерна розвідка; розвідувальна апаратура; інформаційна операція та війна; програмна закладка; технічні засоби комп'ютерної розвідки; криптоаналіз.

Професійні компетентності:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

здатність розуміти основні напрями, цілі, фундаментальні принципи комп'ютерної розвідки; фізичні основи захисту від комп'ютерної розвідки з погляду захисту інформації.

Рекомендована література [1; 7; 9; 12].

10.1. Основні поняття

Поняття *комп'ютерна розвідка* (КР) та *інформаційна війна* (ІВ) тісно пов'язано. Уперше термін "інформаційна війна" з'явився у звіті Томаса Рона "Системи зброї та інформаційна війна", підготовленому ним 1976 р. для компанії "Боїнг". На початок 1980 р. вже склалося загальне уявлення про те, що інформація може бути як метою, так і зброєю.

У зв'язку з появою нових завдань після закінчення "холодної війни", термін *інформаційна війна* було запроваджено в документи міністерства оборони США. Наприкінці 1996 р. Роберт Банкер, експерт Пентагону, на одному із симпозіумів презентував доповідь, присвячену новій програмі будівництва та бойового застосування збройних сил США ХХІ століття (концепція Force 21). У її основу було покладено поділ усього театру військових дій на дві складові – **традиційне** та **кіберпростір**, причому останнє має навіть більш важливе значення.

Отже, до сфер ведення бойових дій, крім суші, океану, повітря й космосу, тепер включено й **інфосферу**.

Як підкреслюють військові експерти, основними об'єктами ураження в нових війнах будуть інформаційна інфраструктура та психіка противника (виник навіть термін *human network*).

У жовтні 1998 року міністерство оборони США вводить у дію Об'єднану доктрину інформаційних операцій, що було пов'язано з необхідністю в розрізненні понять "інформаційна операція" та "інформаційна війна", які було сформульовано так.

Інформаційна операція – це дії, що застосовують, із метою утруднення збирання, оброблення, передавання та зберігання інформації системами противника під час захисту власної інформації та систем.

Інформаційна війна (ІВ) – комплексний вплив (сукупність інформаційних операцій) на систему державного та військового управління

протилежної сторони, її військово-політичне керівництво, яке вже в мирний час привело б до ухвалення сприятливих для сторони-ініціатора інформаційного впливу рішень, а в ході конфлікту повністю паралізувало інфраструктуру управління противника.

ІВ складається із заходів, що застосовують, із метою досягнення інформаційної переваги в забезпеченні національної військової стратегії шляхом впливу на інформацію та інформаційні системи противника з одночасним зміцненням і захистом власної інформації, а також інформаційних систем та інфраструктури.

Інформаційну перевагу визначають як здатність збирати, обробляти й розподіляти безперервний потік інформації про ситуацію, перешкоджаючи противнику робити те саме.

Активність користувачів мережі "Інтернет" створила новий політично вмотивований тип нападів на інформаційні системи, названий у зарубіжній літературі "хактивізм" (від англ. *hacker* – *зломник комп'ютерних систем*).

Перевага інформаційної війни перед традиційними бойовими діями – у високій ефективності за мінімальних витрат.

Нині засоби ведення інформаційної війни розробляють більш ніж у 130 країнах. Інформаційну війну ведуть як у воєнний, так і в мирний час.

10.2. Особливості комп'ютерної розвідки

Найважливішу роль у досягненні інформаційного панування відводять **віртуальній розвідці** – розвідці в інформаційних потоках, яку в гігантських розмірах здійснюють усі державні та приватні організації й особи.

Віртуальна розвідка охоплює *три основні джерела*:

інформаційно-обчислювальні комп'ютерні мережі;

засоби масової інформації;

неперіодичні видання, зокрема відкриті й так звані сірі, тобто ті, що не мають грифа секретності, але не призначені для масового поширення (звіти про НДР, аналітичні довідки, ділове листування, дисертації та ін.).

Розвідка становить цілий комплекс взаємопов'язаних *дій оперативного й технічного характеру*.

Найважливішою *технічною компонентою віртуальної розвідки* є комп'ютерна.

Комп'ютерна розвідка – це:

цілеспрямована діяльність із здобування за допомогою засобів обчислювальної техніки і програмного забезпечення інформації в мережах і /або в окремих засобах обчислювальної техніки;

активні дії, спрямовані на порушення нормального функціонування інформаційно-обчислювальних систем противника.

Розвідку розподіляють на *видобувну, обробну й активну*.

Завдання видобувної розвідки полягає у здобуванні даних, а *обробної* – у перетворенні даних на інформацію та приведення її у форму, зручну для користувача.

Видобувна розвідка буває *попередньою* та *безпосередньою*.

Завдання попередньої розвідки – здобування відомостей про саму автоматизовану паспортну систему оброблення даних (АСОД) противника.

Мета попередньої розвідки – підібрати дані, необхідні для подальшого проникнення в АСОД противника.

Цілей попередньої розвідки досягають шляхом здобування відкритих і закритих відомостей. До *відкритих* можна зарахувати такі: характер та режим роботи АСОД об'єкта розвідки; кваліфікацію його персоналу; склад і структуру самої АСОД; програмне забезпечення; протоколи управління та взаємодії; засоби й методи захисту інформації, що використовують в АСОД.

Для встановлення початкового контакту з АСОД противника необхідно здобути додаткові відомості *закритого характеру*. До таких відомостей належать паролі, коди доступу, інформація про вжиті в АСОД правила розмежування доступу, мережеві адреси обчислювальних засобів противника.

Для здобування подібних відомостей наявні *різноманітні програмні засоби*. До них належать, наприклад, *програми-демони*, що перехоплюють усі команди, що вводять в АСОД. Іншим засобом є *сніфери* – програми, що зчитують перші 128 бітів кожного файлу, у яких нерідко міститься службова інформація про самі файли й АСОД. Є також спеціальні програми підбору паролів.

Крім ключів, інтерес становить *перехоплення шматків зашифрованого тексту із задалегідь відомим змістом*. Це дозволяє виділити із шифрограми секретний ключ, який використовують для подальшого криптоаналізу всього тексту. Відомості, зібрані про АСОД противника

подібним чином, відкривають шлях до здобування інформації, що цікавить замовника, тобто до ведення безпосередньої розвідки.

На стадії безпосередньої розвідки, як і на всіх інших, здобувають не тільки закриті, але також "сірі" та відкриті відомості.

Цінність розвідки відкритих джерел полягає не тільки у її низькій вартості, але й в оперативності, широті охоплення проблеми, поданні конкурентних поглядів, легкості для споживача в користуванні здобутою інформацією.

Найважливою перевагою перехоплення відкритих відомостей під час ведення комп'ютерної розвідки є те, що їх може бути здобуто без порушення прийнятих в АСОД правил розмежування доступу до інформації.

Уже реалізовано плани створення *віртуального розвідувального співтовариства*, що об'єднує всі організації США, пов'язані з обробленням інформаційних потоків (зрозуміло, що не тільки відкритих).

Здобування закритих відомостей завжди пов'язано з несанкціонованим доступом до інформації противника. Здобувають закриті відомості як у самій АСОД об'єкта, так і в інформаційно-обчислювальних мережах, зовнішніх щодо АСОД. За необхідності у здобуванні відомостей закритого характеру організують безпосередню атаку на об'єкт із *використанням даних попередньої розвідки*. Цю форму порушення безпеки інформації, пов'язану з незаконним проникненням у чужі засоби обчислювальної техніки, містять на вістрі сучасного інформаційного протиборства.

Методи злому й захисту комп'ютерних мереж нині розвивають дуже динамічно.

У зовнішніх мережах перехоплюють ті повідомлення, які об'єкт розвідки пересилає зовнішнім адресатам або, у разі віртуальної мережі, ті повідомлення, які циркулюють між окремими сегментами АСОД.

Можна виділити такі *способи перехоплення закритих відомостей у зовнішніх мережах*:

зміну маршрутизації під час пересилання повідомлень, що дозволяє проводити інформацію через свій сервер, на якому здійснюють перехоплення та запис даних;

читання електронної пошти, яка, зазвичай, є легкою здобиччю на сервері відправника та сервері отримувача;

фальсифікацію сервера-адресата, що в разі успіху дозволяє здобути у відправника ту чи ту закриту інформацію.

Програмне проникнення в АСОД об'єкта, із метою розвідки, можна здійснюватися *кількома способами*.

Окрему групу таких способів становить проникнення через периферійні, не пов'язані з роботою пристрої (клавіатуру, дисководи тощо). Набір методів проникнення є досить широким, і його визначено кваліфікацією зломщика і ступенем досконалості встановлених на об'єкті систем захисту від несанкціонованого доступу. Уважають, що абсолютно надійних систем захисту на сьогодні немає.

Найбільш численна й динамічна група способів програмного проникнення в АСОД противника – це **проникнення із зовнішніх мереж**.

Можна виділити два основні шляхи:

проникнення з використанням паролів та ідентифікаторів, визначених в результаті попередньої розвідки;

пошук помилок (так званих *люків, чорних ходів, лазівок*) у програмному забезпеченні, яке в АСОД.

Велику кількість люків *пояснено* насамперед помилками й непередбачливістю авторів програмного забезпечення. Іноді автори встановлюють люки для полегшення налагодження програми, а потім *забувають їх ліквідувати*. Люки залишаються автором програмного забезпечення навмисно, *щоб створити собі привілеї під час подальшої експлуатації програми*, а численні хакери знаходять ці люки та використовують їх у своїх цілях. У цьому разі мова йде про впровадження в АСОД програмного забезпечення з *незадекларованими можливостями*. Найбільш поширеним є використання *електронних дощок оголошень (BBS) і приватних серверів*, що пропонують безкоштовні версії ігор або корисних програмних продуктів (наприклад, архіватори pk.zip, pk.exe). Багато з таких продуктів, які називають "троянськими конями", містять неоголошені функції.

Можливі варіанти, коли сама програма є нешкідливою, але впроваджує в АСОД *іншу самотійну програму*, що виконує, серед інших, і розвідувальні функції. Таку впроваджену програму називають **програмною закладкою**. Недостатньо дістатися до жорсткого диска противника й завантажити з нього дані. Необхідно відновити вилучені файли противника, ретельно розібратися у здобутих відомостях. Цю функцію виконує **обробна розвідка**. *Спеціальні програми* дозволяють визначити тип фрагмента колись віддаленого файла та відновити інформацію, що містилася в ньому; зіставити й логічно пов'язати наявні файли; усунути дублювання; відібрати

за ключовими словами й асоційованим поняттям тільки ту інформацію, яка нині необхідна замовнику.

Для *ведення експрес-аналізу* в мережі створено спеціальні програми, так звані **ноуботи** – програмні продукти, що переміщуються від комп'ютера до комп'ютера з можливістю розмноження, які відстежують стан справ і передають зведену інформацію каналами обміну даними.

За допомогою комп'ютерної розвідки можна не тільки аналізувати конкретні дані, що циркулюють в мережі, безщодо до їхнього джерела, а й відстежувати діяльність конкретних організацій та окремих осіб.

Обробленню піддають не тільки закриті, але й відкриті відомості. Відповідний аналіз відкритих джерел дозволяє *синтезувати інформацію закритого характеру*. Відомо, що вивчення 10 000 відкритих документів дозволяє за деяких умов здобути один документ вищого ступеня секретності. Одним із завдань обробної комп'ютерної розвідки є здійснення елементів *криптоаналізу*.

Криптоаналіз – це наука про розкриття алгоритмів шифрування, підбору ключів і відновлення інформації із зашифрованого повідомлення. У криптоаналізі широко використовують комп'ютерні методи оброблення інформації, тому його можна зарахувати до обробної технічної розвідки.

Комп'ютерна розвідка передбачає не тільки збирання інформації, а й *активні дії*, спрямовані на порушення нормального функціонування обчислювальної техніки та інформаційно-обчислювальних мереж.

Активна комп'ютерна розвідка вирішує завдання знищення, зміни, розкрадання та блокування інформації.

Для маскування несанкціонованого доступу можна модифікувати деяку службову інформацію в операційній системі та засобах захисту АСОД противника.

До активної комп'ютерної розвідки можна зарахувати таке:

візуальне та акустичне спостереження в АСОД об'єкта;

застосування апаратних закладних пристроїв у засобах обчислювальної техніки;

упровадження апаратного забезпечення з незадекларованими можливостями (наприклад, центральних процесорів із функціями знімання інформації, закладеними в них ще на стадії виготовлення);

розвідку побічних електромагнітних випромінювань і наведень у засобах електронно-обчислювальної техніки.

Застосовувані в цьому разі засоби та способи використовують і в інших різновидах технічної розвідки.

В інформаційно-обчислювальних мережах *загального користування* застосовують такий прийом, як утягування в телеконференції людини – носія важливої інформації – та спробу "розкрити" її на розголошення певних відомостей.

Інформаційно-обчислювальну мережу можна використовувати як канал зв'язку з агентами для передавання відповідних інструкцій і розвідувальної інформації.

10.3. АСОД та основні способи несанкціонованого доступу

Склад типової апаратури АСОД:

АЦПУ – автоматизований центральний пульт управління;

ШУ – шина управління;

НМБ і НМС – носії інформації на магнітних барабанах і магнітних стрічках, відповідно;

ШЖ – шина живлення;

ВНІ – відходи носіїв інформації;

ЕМН – електромагнітні наведення на сусідні кола.

Обчислювальна система (ОС) містить п'ять основних компонентів, привабливих за несанкціонованого доступу (НСД) до комп'ютерної інформації:

1) уведення даних. Із цією метою використовують такі пристрої: зчитування інформації, віддалені термінали, накопичувачі на дисках тощо;

2) прикладне та системне програмне забезпечення (ПЗ);

3) центральний процесор здійснює вибір даних і команд з операційної системи ЕОМ;

4) кінцеві пристрої, що містять важливу вихідну інформацію;

5) канали зв'язку. Є слабким місцем із погляду безпеки ОС.

Можливі канали несанкціонованого доступу до:

терміналів і ПЕОМ;

засобів відображення інформації (дисплея, табло);

носіїв інформації;

засобів завантаження ПЗ;

інформації під час ремонту та профілактики апаратури;

внутрішнього монтажу апаратури;
ліній зв'язку апаратури та каналів зв'язку;
інформації шляхом побічних електромагнітних випромінювань;
інформації шляхом електромагнітних наведень на сусідні кола;
технологічних пультів;
відходів носіїв інформації.

До **основних способів НСД** слід умовно зарахувати таке:
подолання програмних засобів захисту;
несанкціоноване копіювання;
перехоплення інформації в каналах зв'язку;
упровадження програмних закладок і комп'ютерних вірусів;
перехоплення побічних електромагнітних випромінювань і наведень;
використання апаратних закладок;
а також деякі інші.

Слід зазначити *можливість копіювання файлів, видалених законним користувачем*. Під час видалення знищують не файл, а тільки його ім'я з таблиці розміщення, уміст же залишається на диску й затирається під час нових записів. Для пошуку та відновлення незатертих файлів можна користуватися спеціальними утилітами типу Norton Utilities.

Деякі комп'ютерні системи захисту інформації *передбачають гарантоване видалення файлів*, наприклад, шляхом триразового запису одиниць на місце, що звільнилося.

Використання **програмних закладок** дозволяє вирішувати завдання як перехоплення конфіденційної інформації з копіюванням її, так і злову систем захисту. Програмні закладки зазвичай маскують усередині інших програмних продуктів. За принципом дії вони потрапляють у розряд програм, відомих як "троянський кінь".

Упровадження комп'ютерних вірусів є близьким до застосування програмних закладок, відмінність у тому, що мета впровадження – модифікація та знищення інформації в системах конкурентів.

Апаратні закладки – це спеціальні мікросхеми, які виконують ті самі функції, що й програмні закладки або радіозакладні пристрої. Вони можуть перехоплювати інформацію, наприклад із клавіатури або відеокарти, або фіксувати аудіоінформацію, а потім передавати її радіоканалом у пункт приймання. Відомі й радіозакладки, які активізують комп'ютерні віруси за командою.

10.3.1. Подолання програмних засобів захисту

Нині відомо величезна кількість хакерських розробок, призначених для подолання програмних засобів захисту.

Одні з таких програм призначено для перехоплення повідомлень і повноважень із доступу до ресурсів мережі за допомогою незаконного підключення до каналу зв'язку, інші – для подолання системи захисту персонального комп'ютера або корпоративної мережі іншим зареєстрованим користувачем.

Перехоплення з незаконним підключенням до каналу зв'язку можна здійснювати безліччю способів, найбільш відомими з яких є такі:

робота в мережі в проміжки часу, коли законний користувач залишає канал в активному режимі, відволікаючись на інші завдання;

робота паралельно зареєстрованому користувачу, але в моменти, коли немає безпосереднього обміну інформацією;

робота після завершення сеансу зареєстрованим користувачем шляхом перехоплення сигналу про закінчення.

Для подолання систем захисту під виглядом зареєстрованого користувача хакери часто застосовують такі методи:

перебір можливих паролів;

пошук слабких місць (проломів), пов'язаних із невдалим алгоритмом функціонування систем захисту або наявністю програмних помилок;

іноді пролом маскують двома-трьома додатковими командами, із метою створення так званого люка;

використання програм, що імітують аварійні перебої й аналізують адекватність реакції системи.

10.3.2. Подолання парольного захисту

Один із найбільш поширених способів розмежування доступу до ресурсів обчислювальних систем – уведення паролів.

У будь-якому персональному комп'ютері можна умовно виділити три види паролів:

що зберігають у CMOS-пам'яті;

що зберігають в операційній системі;

автентифікації користувачів у встановленій системі захисту.

10.3.2.1. Зняття паролів, що зберігають у CMOS-пам'яті

CMOS – це аббревіатура англійських слів complementary metal oxide semiconductor – узято просто назву матеріалу, із якого виготовлено відповідну мікросхему. У ній записують усю необхідну інформацію для завантаження комп'ютера, зокрема й паролі.

Власник першого пароля може здійснювати як завантаження операційної системи, так і зміну опцій у меню УСТАНОВКИ BIOS; людина, знайома тільки із другим паролем, може здійснювати завантаження операційної системи та входити в меню УСТАНОВКИ BIOS для зміни розділу USER PASSWORD.

Є як мінімум два прості методи її подолання.

Перший спосіб засновано на тому, що CMOS-пам'ять не може працювати без живлення від батарейки, установленної всередині системного блока.

Другий спосіб у принципі повторює перший і спеціально передбачений конструкторами на випадок забування пароля. Його застосування навіть описано в керівництві користувача.

10.3.2.2. Подолання паролів операційної системи

Різні операційні системи мають різну стійкість до несанкціонованого доступу.

Однією з найбільш захищених операційних систем вважають Windows NT. Проблема полягає в тому, що користувачі, які мають доступ до засобів редагування реєстру, наприклад до опції Password (паролі) із Control Panel (панелі управління), легко можуть відключити цю систему безпеки, блокувавши застосування призначених для користувача профілів.

10.3.2.3. Перехоплення паролів

Реальний захист інформації, що зберігають у комп'ютерній системі, можуть дати лише спеціально розроблені програмні й апаратні засоби захисту, оскільки подолати їх можуть тільки фахівці, які добре знають операційну систему, що атакують, способи побудови сучасних систем захисту та методи злому.

Описувати ці методи не дозволяють ні етичні міркування, ні мета наших занять.

Парольний захист – це аж ніяк не синонім поняття "поганий захист". Однак вона має як мінімум дві слабкі сторони.

Перша пов'язана з тим, що паролі, за якими здійснюють автентифікацію користувачів, мають десь зберігати.

Зазвичай це таблиця паролів, що входить до складу програмного забезпечення операційної системи або системи захисту комп'ютера або комп'ютерної мережі.

Друга пов'язана з можливістю таємного впровадження програмної закладки в комп'ютерну систему, що дозволяє зловмисникові здійснювати несанкціонований доступ до інформаційних ресурсів.

Перехоплювачі паролів – це один із найбільш поширених видів програмних закладок.

Розрізняють три типи перехоплювачів паролів: імітатори системи реєстрації, фільтри та замітники.

Принцип дії *програм-фільтрів* полягає в перехопленні всієї інформації, що вводять із клавіатури комп'ютера, й аналізі її (фільтрації), із метою виявлення ставлення до призначених для користувача паролів.

Замінники – це програмні модулі, які повністю або частково замінюють справжні, що відповідають у системі захисту за автентифікацію користувачів. Істотною перевагою заміників є можливість роботи в середовищі практично будь-якої багатокористувальницької системи.

10.4. Використання програмних закладок і комп'ютерних вірусів

Створенням програмної закладки або вірусу не закінчується завдання, поставлене під час їхнього написання. Не менш складно впровадити програмний продукт. Про важливість і складність цього свідчить той факт, що впровадженням займаються *навіть державні структури деяких країн*.

Можна виділити три основні групи способів упровадження програмних закладок і комп'ютерних вірусів:

- на етапі створення апаратури та програмного забезпечення;
- через системи інформаційного обміну;
- силовим або ВЧ-нав'язуванням.

Сучасні програмні продукти містять приблизно до півмільйона рядків, ніхто краще авторів-програмістів їх не знає й перевірити ефективно не може. Тому творці програмного забезпечення є потенційними об'єктами підвищеного інтересу певних служб і підприємств.

Однак більш перспективним напрямом експерти вважають *інфікування (модифікацію) систем штучного інтелекту*, які допомагають створювати це програмне забезпечення.

Іншим напрямом упровадження є *використання систем інформаційного обміну*. Тут є два способи – безпосереднє й непряме підключення.

Безпосереднє підключення (front-door coupling) буває пряме й непряме.

Пряме підключення полягає в повторюваній трансляції вірусного сигналу або програмної закладки в період приймання конкурентом призначеної йому корисної інформації.

Кращим вважають використання *непрямого підключення*. Проникнення в інформаційну систему. У цьому разі відбувається в найбільш незахищеному місці, звідки вірус або програмна закладка можуть дістатися до призначеного вузла.

Непряме підключення (back-door) здійснюють рядом способів: від впливу на систему через неосновні елементи (наприклад, через ланцюги електроживлення) до навмисного передавання конкуренту інфікованої техніки або програмних продуктів.

Перспективним напрямом упровадження програмних закладок або вірусів в інформаційні системи вважають використання **методів силового** або **ВЧ-нав'язування**.

У найбільш простому вигляді процес ВЧ-нав'язування закладок і вірусів має приблизно такий вигляд. Потужне високочастотне випромінювання, промодульоване інформаційним сигналом, опромінює об'єкт електронно-обчислювальної техніки. У ланцюгах комп'ютера або лінії зв'язку наведено відповідні напруги й струми, які певним чином детектуються на напівпровідникових елементах електронної схеми обчислювального засобу. У результаті вірус або закладка виявляються впровадженими в комп'ютер.

Характерними прикладами програмних закладок можуть бути "*троянський кінь*" або "*логічна бомба*", які спрацьовують під час виконання певних умов і частково або повністю виводять із ладу комп'ютерну систему.

Використання "троянського коня" полягає в таємному введенні в чужу програму таких команд, які дозволяють здійснювати не заплановані власником функції, але одночасно зберігати й колишню працездатність.

За структурою всі віруси може бути розподілено на два різновиди, виявлення яких відрізняється за складністю: *вulgарний* і *роздроблений вірус*.

Програму **вulgарного вірусу** записують єдиним блоком, і в разі виникнення підозр у зараженні ЕОМ експерти можуть виявити її на самому початку епідемії (розмноження).

Програму **роздробленого вірусу** розподілено на частини, які, на перший погляд, не мають між собою зв'язку. Ці частини містять інструкції, які вказують комп'ютеру, як скласти їх воєдино, щоб відтворити й, отже, розмножити вірус. Вірус майже весь час перебуває в розподіленому стані, лише на короткий час роботи, складаючись у єдине ціле. Зазвичай, творці вірусу вказують кількість репродукцій, після досягнення якої він стає агресивним. Слід згадати про віруси, що маскуються, – *stealth-віруси* та віруси-мутанти.

Stealth-віруси не можна виявити, просто переглядаючи файли на носію інформації. Переглядаючи файл, заражений вірусом, у текстовому редакторі, ви не знайдете навіть натяку на зараження – вірус означає, що ви переглядаєте файл, і видаляє себе з нього. Закриваєте файл – вірус знову на місці.

Віруси-мутанти містять алгоритми шифрування-розшифрування. Упроваджуючи свою копію у програму, такий вірус шифрує свій програмний код, тому вірус, що заразив два різних файли, не має жодної повторюваної ділянки коду.

Варіанти вірусів залежать від цілей, які ставлять за мету їхні творці.

Фахівці застерігають від копіювання крадених програм. Однак і програми, які офіційно постачають, можуть бути джерелом зараження.

Часто проводять паралель між комп'ютерним вірусом і вірусом AIDS. Тільки впорядковане життя з одним або декількома партнерами здатне вберегти від цього вірусу. Невпорядковані зв'язки з багатьма комп'ютерами майже напевно призводять до зараження.

Контрольні запитання

1. Що означає термін "інформаційна операція"?
2. Що означає термін "інформаційна війна"?

3. Що означає термін "інформаційна перевага"?
4. Що означає термін "віртуальна розвідка"?
5. Які три основні джерела містить віртуальна розвідка?
6. Що означає термін "комп'ютерна розвідка"?
7. У чому полягає завдання видобувної розвідки?
8. Які дані можна зарахувати до відкритих?
9. У чому полягає цінність розвідки відкритих джерел?
10. Які способи перехоплення закритих відомостей у зовнішніх мережах можна виділити?
11. Яку програму називають програмною закладкою?
12. Які завдання вирішує активна комп'ютерна розвідка?
13. Якими є можливі канали несанкціонованого доступу до комп'ютерної інформації?
14. Які три види паролів можна умовно виділити в будь-якому персональному комп'ютері?
15. Які три основні групи способів упровадження програмних закладок і комп'ютерних вірусів можна виділити?
16. У чому полягає сутність методів ВЧ-нав'язування?
17. Як спрацьовують програмні закладки "троянський кінь"?

11. Фізичні основи захисту від радіотеплової розвідки

Мета: розглянути основні поняття й походження радіотеплової розвідки; основні напрями, цілі, принципи та завдання радіотеплової розвідки; характеристики радіотеплових сигналів.

Основні питання

- 11.1. Основні поняття. Фізична сутність теплового випромінювання та його закони.
- 11.2. Кількісні характеристики радіотеплового випромінювання.
- 11.3. Радіотеплове випромінювання природних і штучних об'єктів.
- 11.4. Характеристики радіотеплових сигналів.
- 11.5. Особливості приймання радіотеплових сигналів.
- 11.6. Радіотеплові сигнали як передавачі інформації.
- 11.7. Структурні схеми радіотеплолокаторів.

Ключові слова: теплове випромінювання; радіотеплова розвідка; радіотеплові сигнали; радіотеплолокатор; технічні засоби радіотеплової розвідки; інформативний сигнал.

Професійні компетентності:

знання основних складових технічної розвідки та здатність до вибору методів розв'язання типових задач;

здатність розуміти основні напрями, цілі, фундаментальні принципи радіотеплової розвідки; фізичні основи захисту від радіотеплової розвідки з погляду захисту інформації.

Рекомендована література [1; 9; 12; 17].

11.1. Основні поняття. Фізична сутність теплого випромінювання та його закони

Радіотеплову розвідку засновано на виявленні та визначенні місця розташування наземних, морських, повітряних та космічних об'єктів за їхнім тепловим випромінюванням у радіодіапазоні. Характеристики радіотеплового випромінювання (інтенсивність, спектральний склад, спектральна густина) залежать від фізичних властивостей речовини і температури випромінювального об'єкта.

Реальний радіотепловий сигнал, що випромінює об'єкт, становить безперервний шум із дуже широким суцільним спектром (від метрового до міліметрового діапазону хвиль) і низькою спектральною густиною. Інтенсивність радіотеплового випромінювання об'єктів становить у мілі- й субміліметрових діапазонах соті та десяті частки відсотка, а в сантиметровому діапазоні – соті та тисячні частки відсотка від загальної інтенсивності теплового випромінювання. Тому для підвищення потужності сигналу застосовують приймальні пристрої з дуже широкою смугою пропускання з високою частотою – сотні й тисячі мегагерц. Завдяки цьому потужність випромінювання, що приймає радіотеплолокаційна станція (РТЛС), може досягати $10 - 10^2$ Вт.

Значно кращими показниками радіотеплової розвідки є абсолютна потайність ведення й незалежність від метеоумов. Потайність обумовлено пасивним режимом роботи засобів розвідки, що ускладнює протидію розвідку параметрів РТЛС та організацію її радіоелектронного придушення. Усепогодність радіотеплової розвідки забезпечено шляхом роботи в діапазонах сантиметрових і міліметрових хвиль. Залежність умов

поширення від стану середовища в цих діапазонах не є настільки значною, порівняно з ІЧ-діапазоном.

Відомо, що будь-яка речовина (тверда, рідка або газоподібна), крім електрично нейтральних частинок, містить у своєму складі велику кількість заряджених – електронів і позитивних іонів. Ці частинки перебувають у безперервному хаотичному русі, причому їхня середня швидкість є тим більшою, чим вищою температура речовини. У процесі руху заряджені частинки постійно стикаються одна з одною та нейтральними частинками; під час зіткнень частина їхньої кінетичної енергії переходить в енергію електромагнітного випромінювання, швидкість сама дещо зменшується. Отже, кінетична енергія частинок, пропорційна ступеню нагріву тіла, частково перетворюється на енергію електромагнітного поля. У створенні теплового випромінювання бере участь дуже велика кількість частинок, що стикаються хаотично, в одні моменти часу відбувається більша кількість зіткнень, в інші – менша. Кінетична енергія, перетворюється на випромінювання, неоднакове в різні моменти часу.

Теплове випромінювання – це електромагнітне випромінювання, що випускає речовина за допомогою її внутрішньої енергії. У нагрітих тілах частина внутрішньої енергії речовини може перетворюватися на енергію випромінювання. Тому нагріті тіла є джерелами електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот. Усі інші види світіння (випромінювання світла), що збуджуються за допомогою будь-якого того виду енергії, крім теплової, називають **люмінесценцією**. За визначенням С. І. Вавілова, *люмінесценція* – це випромінювання, надлишкове над тепловим; воно має тривалість, яка значно перевищує період світлових коливань. Є три види люмінесценції:

окиснення – *хемілюмінесценція*;

світіння під час перебігу струму в газі, рідині або твердих тілах – *електролюмінесценція*;

світіння під дією світла – *фотолюмінесценція* тощо.

Речовину, що світиться, називають *люмінофором*.

Дослід показує, що єдиним видом випромінювання, яке може перебувати в рівновазі з випромінювальними тілами, є *теплове випромінювання*. Усі види люмінесценції виявляють нерівноважними. Експерименти показують, що теплове випромінювання має безперервний спектр. Це означає, що нагріте тіло випускає деяку кількість енергії випромінювання в будь-якому діапазоні частот або довжин хвиль.

Розподіл енергії випромінювання тіла за спектром залежить від температури тіла. Для всіх тіл із підвищенням температури максимум енергії випромінювання зміщується в короткохвильовий діапазон спектра, а загальна енергія випромінювання зростає. Так, якщо випромінювання батареї центрального опалення ($T \approx 350 \text{ K}$) має пік енергії в діапазоні невидимого інфрачервоного випромінювання, то розпечена поверхня Сонця ($T \approx 6 \cdot 10^3 \text{ K}$) випромінює значну частину енергії в діапазоні видимого світла, а за ядерного вибуху ($T \approx 10^6 \text{ K}$) велика частка його енергії рухається короткохвильовими рентгенівськими й γ -випромінюваннями.

Якщо кілька нагрітих випромінювальних тіл оточити непроникною для випромінювання ідеально відбивною оболонкою, то після закінчення деякого проміжку часу в системі "випромінювальні тіла + випромінювання в порожнині" встановиться термодинамічна рівновага. Це означає, що температури всіх тіл вирівнюються, а розподіл енергії між тілами та випромінюванням не буде змінюватися із часом. Такий рівноважний стан системи сталий, тобто після всякого його порушення стан рівноваги знову відновлюється. Термодинамічна рівновага встановиться і в порожнині, стінки якої виконано з будь-якого реального матеріалу, та буде підтримуватися за деякої незмінної температури.

Здатність теплового випромінювання перебувати в рівновазі з тілом, що випромінює, відрізняє теплове від інших видів випромінювання. Тому таке випромінювання, що перебуває в рівновазі з випромінювальним тілом, будемо називати *рівноважним*. Рівноважному випромінюванню можна приписати температуру, з якою тіло перебуває в рівновазі, поширивши закони рівноважної термодинаміки на теплове випромінювання. Це означає, що для рівноважного теплового випромінювання можна визначити та розрахувати внутрішню енергію, тиск, ентропію та інші термодинамічні характеристики, які не будуть змінюватися із часом. Рівноважне теплове випромінювання є однорідним, тобто густина його енергії є однаковою в усіх точках усередині порожнини, де воно є. Таке випромінювання є *ізотропним* і *неполяризованим* – воно містить усі можливі напрямки поширення та коливань векторів \vec{E} і \vec{H} .

Інтенсивність теплового випромінювання безперервно змінюється, причому значення та швидкість цих змін точно передбачити є неможливим. Те саме можна сказати й про спектральний склад випромінювання: оскільки частота випромінювання, що виникає під час гальмування заряджених частинок, залежить від їхньої кінетичної енергії, яка для різних

частинок є неоднаковою, то інтенсивність випромінювання на певній частоті (спектральна густина випромінювання) також буде безперервно та хаотично коливатися.

З усього цього випливає, що теплове випромінювання відрізняється від штучно генерованих тим, що, по-перше, воно займає дуже широкий діапазон хвиль, а, по-друге, його потужність і спектральна густина не залишаються постійними та безперервно флюктують. Проте, незважаючи на хаотичність поведінки окремих частинок, середні характеристики дуже великої кількості частинок може бути розраховано з високою точністю. Такими методами й було визначено закони теплового випромінювання.

Для опису спектрального складу теплового випромінювання розглянемо енергію, що випромінюється одиницею поверхні нагрітого тіла за одиницю часу у вузькому діапазоні частот від ω до $\omega + d\omega$. Цей потік променистої енергії dR , що випускається з одиниці поверхні тіла в усіх напрямках, пропорційний ширині спектрального діапазону, тобто маємо таке $dR = r d\omega$. Енергію r , що припадає на одиничний діапазон частот, називають *спектральною емісійною здатністю тіла*, або *спектральною густиною енергетичної світності*. Дослід показує, що для кожного тіла випромінювальна здатність є певною функцією частоти, вид якої змінюється зі зміною температури тіла T . Надалі для такої функціональної залежності $r = r(\omega, T)$, що розглядають для цього значення температури тіла як деяку функцію частоти, будемо використовувати прийняте в теорії теплового випромінювання позначення: $r(\omega, T) = r_{\omega, T}$.

Сумарний потік енергії випромінювання з одиниці поверхні тіла в усьому діапазоні частот $R = \int_0^{\infty} r_{\omega, T} d\omega$ називають *інтегральною емісійною здатністю тіла*, або його *енергетичною світністю*. У системі СІ енергетичну світність вимірюють $\text{Вт}/\text{м}^2$, а спектральна емісійна здатність має розмірність $\text{Дж}/\text{м}^2$. Емісійну здатність тіла можна подавати і як функцію довжини хвилі випромінювання λ , пов'язану із частотою ω через швидкість світла у вакуумі c за формулою $\lambda = 2\pi c / \omega$. Дійсно, виділяючи потоки випромінювання, що припадають на інтервал частот $d\omega$ і на відповідний йому інтервал довжин хвиль $d\lambda$, і прирівнюючи їх один до одного, обчислюємо, що $r_{\omega, T} d\omega = r_{\lambda, T} d\lambda$. Звідси визначаємо формулу зв'язку між емісійними здатностями за шкалою частот і шкалою довжин хвиль:

$r_{\lambda,T} = r_{\omega,T} \frac{d\omega}{d\lambda} = r_{\omega,T} \frac{2\pi c}{\lambda^2}$. Знак "мінус" похідної $\frac{d\omega}{d\lambda}$ у формулі формально пропущено, оскільки він лише показує, що зі зростанням довжини хвилі λ частота ω убиває.

Для опису процесу поглинання тілами випромінювання введемо *спектральну поглинальну здатність тіла* $\alpha_{\omega,T}$. Для цього виділимо вузький інтервал частот від ω до $\omega + d\omega$ і розглянемо потік випромінювання $d\Phi_{\omega}$, який падає на поверхню тіла. Якщо частину цього потоку $d\Phi'_{\omega}$ поглинає тіло, то його поглинальну здатність на частоті ω визначимо як безрозмірну величину $\alpha_{\omega,T} = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}}$, яка характеризує частку випромінювання із частотою ω , яке падає на тіло та поглинається ним. Дослід показує, що будь-яке реальне тіло поглинає випромінювання різних частот по-різному, залежно від його температури. Тому спектральна поглинальна здатність тіла $\alpha_{\omega,T}$ є функцією частоти ω , вид якої змінюється зі зміною температури тіла T . За своїм визначенням поглинальна здатність тіла не може бути більшою за одиницю. Тіло, у якого поглинальна здатність є меншою за одиницю й однаковою в усьому діапазоні частот, називають *сірим тілом*.

Особливе місце в теорії теплового випромінювання належить *абсолютно чорному тілу*. Так Г. Кірхгоф назвав тіло, у якого на всіх частотах і за будь-яких температур поглинальна здатність дорівнює одиниці.

Реальне тіло завжди відбиває частину енергії випромінювання, що падає на нього (рис. 11.1). Навіть сажа наближається за властивостями до абсолютно чорного тіла лише в оптичному діапазоні.

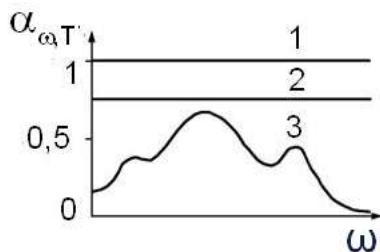


Рис. 11.1. Залежності спектральної поглинальної здатності тіл:
1 – абсолютно чорне тіло; 2 – сіре тіло; 3 – реальне тіло

Абсолютно чорне тіло (АЧТ) є еталоном у теорії теплового випромінювання. І хоча у природі немає абсолютно чорного тіла, досить просто реалізувати модель, для якої поглинальна здатність на всіх частотах буде незначно відрізнятися від одиниці. Таку модель абсолютно чорного тіла можна виготовити у вигляді замкненої порожнини, забезпеченої малим отвором, діаметр якого є значно меншим за поперечні розміри порожнини. Порожнина може мати практично будь-яку форму й бути виготовленою з будь-якого матеріалу. Малий отвір має властивість майже повністю поглинати випромінювання, що падає на нього. Причому зі зменшенням розміру отвору його поглинальна здатність прагне до одиниці. У розглянутій моделі можна вважати, що випромінювання, яке падає на отвір, не відбивається, а повністю поглинається. Тому саме малому отвору й приписують властивість абсолютно чорного тіла. Зазначимо, що якщо стінки порожнини підтримувати в деякій температурі T , то отвір буде випромінювати. Це випромінювання з великою мірою точності можна вважати випромінюванням абсолютно чорного тіла, яке має температуру T . Досліджуючи розподіл енергії цього випромінювання за спектром, можна експериментально визначити *емісійну здатність абсолютно чорного тіла* $r_{\omega, T}^*$ і $r_{\lambda, T}^*$.

Площа, охоплена кривою, дає енергетичну світність абсолютно чорного тіла за відповідної температури. Для різних тіл криві є схожими на функцію розподілу молекул за швидкостями. Але там площі, що охоплюються кривими, є постійними, а тут із підвищенням температури площа істотно збільшується. Це говорить про те, що енергетична сумісність значно залежить від температури. Максимум випромінювання (емісійна здатність) із підвищенням температури зміщується в бік вищих частот.

Нічне бачення. Уночі за відсутності сонячного світла, тобто в темряві, людина перестає бачити навколишні предмети. Однак усі вони, маючи ненульову температуру, продукують електромагнітне теплове випромінювання навіть уночі. За допомогою закону Віна можна оцінити довжину хвилі, на яку припадає максимум емісійної здатності тіла, якщо є відомою його температура. Із цього оцінювання випливає, що за середньої температури тіл близько 300 К основна енергія їхнього теплового випромінювання припадає на інфрачервоне випромінювання з довжиною хвилі близько 10 мкм. Випромінювання у видимій ділянці спектра випромінювання

($0,4 \text{ мкм} < \lambda < 0,7 \text{ мкм}$) за таких температур має занадто малу енергію і її не може бути виявлено неозброєним оком.

Оскільки в бік неба система наземних тіл не є замкненою, то рівноваги між тілами біля поверхні Землі та їхнім випромінюванням не встановлено. Тому всі тіла, температура яких є дещо вищою, ніж температура земної поверхні, може бути зафіксовано в мікрохвильовому діапазоні як випромінювальні об'єкти. Побачити джерела інфрачервоного випромінювання можна тільки за допомогою спеціальних приладів, у яких мікрохвильове невидиме оком випромінювання реєструють спеціальними датчиками інфрачервоного випромінювання. Воно перетворюється на модульовані електричні сигнали, які управляють електронним пучком, що дає на екрані кінескопа видиме зображення предметів.

Наприкінці ХХ ст. відбулася якісна зміна техніки нічного бачення, що пов'язано зі створенням електронно-оптичних перетворювачів нового типу. За допомогою сучасних біноклів і прицілів нічного бачення спостерігач може здобути в темряві видиме зображення достатньо високої якості людини на відстані кількох метрів або рухомого танка на відстані декількох кілометрів. Пілотажні окуляри нічного бачення дозволяють експлуатувати гелікоптери в умовах обмеженої видимості практично цілодобово.

Одним із найбільш важливих законів теплового випромінювання є закон, що виявляє залежність спектральної густини випромінювання від його частоти та температури випромінювача. Цей закон описують формулою Планка:

$$R_0 = \frac{2\pi f^3 h}{c^2 \left(e^{\frac{hf}{kT}} - 1 \right)}, \quad (11.1)$$

де R_0 – спектральна густина випромінювання, яка дорівнює потужності, випроміненої на частоті f у смузі 1 Гц із поверхні 1 м^2 , $\text{Вт}/(\text{Гц м}^2)$;

f – частота, Гц ;

$h = 6,62 \cdot 10^{34}$ – постійна Планка, $\text{Дж} \cdot \text{с}$;

$c = 3 \cdot 10^5$ – швидкість поширення електромагнітних хвиль, $\text{км}/\text{с}$;

$k = 1,38$ – постійна Больцмана, $\text{Дж}/\text{град}$;

T – абсолютна температура випромінювача, К .

Із підвищенням температури спектральна густина випромінювання на всіх частотах зростає, а значить, зростає й загальна потужність випромінювання. Підсумовуючи спектральні густини випромінювання за всіма частотами, визначаємо формулу для інтегральної густини потужності теплового випромінювання у всьому діапазоні електромагнітних хвиль:

$$P = \sigma T^4, \quad (11.2)$$

де $\sigma = 5,71 \cdot 10^8$ – постійна Стефана – Больцмана, Вт/(м² · град⁴).

Сумарна потужність теплового випромінювання може бути дуже високою, проте на радіодіапазон припадає лише дуже мала її частина. Так, за кімнатної температури ідеальний випромінювач площею 1 м² випромінює потужність, що дорівнює 478 Вт; максимум спектральної густини припадає на хвилю 9,6 мікрон. На хвилях, довших за 1 мм, у цьому разі випромінюється потужність усього 8 мВт, тобто трохи більше ніж тисячна частка відсотка загальної потужності.

Частка потужності, яка може бути сприйнята приймачем, є ще меншою, тому що сучасні приймачі не можуть одночасно приймати сигнали в усьому радіотехнічному діапазоні.

У наведеному прикладі частина потужності, яку може сприйняти приймач, перебуває в межах 20 мкВт – 3 МВт. Із підвищенням температури випромінювача частка потужності, яка припадає на радіодіапазон, зменшується, оскільки спектральна густина у ділянці ІЧ і світлових хвиль зростає набагато швидше, ніж спектральна густина потужності в радіотехнічному діапазоні.

Однак, незважаючи на щодо малу потужність теплового радіовипромінювання й завдяки високій чутливості сучасних радіоприймачів, малому загасанню радіохвиль в атмосфері, теплове радіовипромінювання вдається приймати на відстанях більших, ніж більш потужні ІЧ і світлові випромінювання.

Необхідно зазначити, що ф-ла (11.1) є справедливою лише для ідеального випромінювача, так званого абсолютно чорного тіла, для всіх реальних випромінювачів спектральна густина випромінювання є нижчою, ніж у АЧТ, нагрітого до тієї самої температури.

Інтегральну густину випромінювання для реальних об'єктів (сірих тіл), відповідно до закону Стефана – Больцмана, визначають за такою формулою:

$$B = \epsilon T \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (11.3)$$

де ϵT – безрозмірний коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкта або ступінь її чорноти;

σ – постійна Стефана – Больцмана;

T – температура об'єкта.

Коефіцієнт ϵT залежить від температури, матеріалу та стану поверхні об'єкта.

Окиснені й шорсткі поверхні металів випромінюють у 3 – 4 рази більше, ніж гладка поверхня.

Чисельні значення ϵT , залежно від матеріалів і температур, наведено в табл. 11.1.

Таблиця 11.1

Значення коефіцієнта випромінювання поверхні об'єкта, залежно від матеріалів і температур

Назви матеріалів	T, K	ϵT
Алюміній полірований	500 – 850	0,04 – 0,06
Алюміній із шорсткою поверхнею	300	0,06 – 0,07
Вольфрам	500	0,05
Вольфрам	1 800 – 2 500	0,31
Залізо поліроване	700 – 1 300	0,15 – 0,38
Залізо, покрите червоною іржею	300	0,61 – 0,85
Цегла червона	300	0,88 – 0,93
Вода (шар завтовшки більше ніж 0,1мм)	273 – 373	0,96
Лід гладкий	273	0,97
Пісок	300	0,60
Сажа, нанесена на тверду поверхню	370 – 550	0,96
Сніг	273	0,80
Скло	300 – 373	0,94 – 0,91
Сукно чорне	300	0,98
Поле жита	–	0,93

Розгляньмо особливості теплового випромінювання в діапазонах радіохвиль (для стислості будемо називати його просто радіотепловим випромінюванням). Насамперед зазначимо, що для обчислення спектральної густини випромінювання в сантиметровому й міліметровому діапазонах хвиль немає необхідності користуватися громіздкою формулою Планка. Дійсно, на частотах радіодіапазону показник ступеня числа e (див. ф-лу (11.1)) стає дуже малим: за $f = 100\ 000$ МГц (довжина хвилі 3 мм) і $T = 0,012$. Скориставшись наближеною рівністю $e^x \sim 1 + x$, справедливим за $x \ll 1$, легко привести формулу Планка до такого вигляду:

$$R_0 = \frac{2\pi}{\lambda^2} kT, \quad (11.4)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання.

Визначено формулу Релея – Джинса, під час використання якої можна досить точно оцінювати спектральну густину випромінювання в сантиметровому й міліметровому діапазонах хвиль для тіл, що мають температуру, вищу за 100 К.

Із цієї формули випливає, що потужність радіотеплового випромінювання є прямо пропорційною температурі випромінювача й обернено пропорційною квадрату довжини хвилі.

Отже, для радіотеплолокації більш вигідно використовувати хвилі міліметрового й субміліметрового діапазонів, ніж сантиметрового та дециметрового, на яких випромінювання є значно слабкішим.

Оскільки причиною радіотеплового випромінювання є шумові струми надвисоких частот, то, отже, інтенсивність випромінювання має залежати від електричних характеристик речовини випромінювача – провідності та діелектричної проникності. *Провідність речовини* значною мірою визначає його поглинальні властивості, а чим сильніше тіло поглинає енергію стороннього випромінювання, тим кращим тепловим випромінювачем воно є. Так, наприклад, дуже низьку провідність мають високоякісні діелектрики, тому їхнє радіотеплове випромінювання є малим. Значно вищу провідність (на надвисоких частотах) мають протирадіолокаційні покриття, здатні майже повністю поглинати НВЧ-випромінювання, що падає на них, тому інтенсивність їхнього радіотеплового випромінювання, порівняно з усіма іншими матеріалами, є найбільш високою й наближається до інтенсивності випромінювання АЧТ. Однак інтенсивність радіотеплового

випромінювання залежить не тільки від поглинальних властивостей речовини випромінювача. Частина випромінювання, що виходить із товщі випромінювача, відбивається від його поверхні та знову перетворюється на тепло. Це відбивання є тим сильнішим, чим вищою діелектрична проникність випромінювальної речовини.

11.2. Кількісні характеристики радіотеплового випромінювання

Спектральна густина випромінювання реальних тіл залежить від двох фізичних характеристик: коефіцієнта поглинання й абсолютної температури T . Оперувати двома різнорідними характеристиками не завжди зручно, особливо коли доводиться порівнювати між собою різні випромінювальні тіла (цілі). Тому в радіотеплолокації прийнято використовувати одну величину, що дорівнює добутку коефіцієнта поглинання α на абсолютну температуру:

$$T_{\text{я}} = \alpha T. \quad (11.5)$$

Величину $T_{\text{я}}$ називають **радіояскравісною температурою** цього випромінювача, вона дорівнює абсолютній температурі ідеального випромінювача, що створює випромінювання такої самої спектральної густини, як і цей. На відміну від спектральної густини випромінювання, до виразу для радіояскравісної температури не входить довжина хвилі. Практично радіояскравісні температури деяких тіл та об'єктів можуть залежати від довжини хвилі через вплив її на значення коефіцієнта поглинання.

Відомо, що добре відбивні об'єкти не створюють сильного власного випромінювання. Так, радіояскравісна температура металевих об'єктів і покриттів не перевищує 10 – 20 К. Проте металеві об'єкти можуть інтенсивно перевипромінювати (відбивати) радіотеплове випромінювання протяжних (фонових) джерел (земної поверхні, хмар), що падає на них. Сумарну спектральну густина власного та відбитого випромінювань можна записати в такому вигляді:

$$R_{\text{заг.}} = \frac{2\pi}{\lambda^2} (\alpha T + \rho T_{\text{п}}) = \frac{2\pi}{\lambda^2} T_{\text{к}}, \quad T_{\text{к}} = \alpha T + \rho T_{\text{п}}, \quad (11.6)$$

де ρ – коефіцієнт відбивання тіла;

$T_{\text{п}}$ – радіояскравісна температура підсвічувального випромінювання;

$T_{\text{к}}$ – уявна температура випромінювача.

Аналогічно визначенню радіояскравісної температури уявна дорівнює абсолютній температурі ідеального випромінювача, що створює власне випромінювання, яке дорівнює сумарному реальному випромінювача. На відміну від радіояскравісної температури уявна може бути вищою, ніж абсолютна температура випромінювача. Значеннями радіояскравісних і уявних температур зручно користуватися під час порівняння різних реальних випромінювачів.

Великий інтерес становить обчислення потужності, випромінюваної тим чи тим об'єктом. *Потужність радіотеплового випромінювання* залежить не тільки від уявної температури та площі об'єкта, але й від його форми, ступеня гладкості поверхні та ряду інших важко прогнозованих чинників. Однак для об'єктів простої конфігурації ними можна знехтувати. Тоді вираз для потужності випромінювання може бути записано в такому вигляді:

$$R_{\text{випр.}} \approx \frac{2\pi}{\lambda^2} k T_k S_c \Delta f. \quad (11.7)$$

Усе викладене раніше стосувалося енергетичних характеристик випромінювання – яскравісної температури, уявної температури, потужності. Однак знання одних цих характеристик недостатньо, щоб оцінювати можливості виявлення радіотеплових випромінювачів. Для цього треба знати, які діаграми спрямованості (ДС) радіотеплових випромінювачів і яка поляризація антен потрібна для приймання.

На відміну від ДС радіолокаційного перевипромінювання, які для більшості об'єктів мають порізану пелюсткову структуру, ДС радіотеплові випромінювання мають набагато більшу рівномірність. Це цілком зрозуміло, адже випромінювання об'єкта складається з абсолютно незалежних випромінювань окремих ділянок. Тому в діаграмах власного радіотеплового випромінювання принципово не може бути нульових провалів, і за першого наближення будемо вважати, що радіояскравісна температура об'єктів нескладної форми, виконаних з однорідного матеріалу, не залежить від напрямку. Цілком так само це стосується й площадних (фонових) випромінювачів із дрібними, порівняно з довжиною хвилі, нерівностями поверхні (шорсткими випромінювачами). Якщо поверхня випромінювача є абсолютно гладкою або висота нерівностей набагато більшою за довжину хвилі, то коефіцієнт випромінювання, а разом із ним радіояскравісна

й уявна температури будуть залежати від напрямку, під яким цей відбивач розглядають радіотеплолокатором.

11.3. Радіотеплове випромінювання природних і штучних об'єктів

Реальні радіотеплові випромінювачі (штучні та природні) часто мають властивості, які значно відрізняються від властивостей ідеального випромінювача – АЧТ. Тому уявна температура реальних випромінювачів може варіювати під час зміни довжини хвилі та виду поляризації. Крім того, уявна температура об'єктів може залежати й від напрямку, із якого ці об'єкти спостерігають. Нарешті, на уявну температуру будуть впливати час доби, пора року й метеорологічні умови, особливо ступінь вологості поверхні об'єкта.

Металеві об'єкти випромінюють дуже слабо, тому їхню уявну температуру переважно визначають за яскравісною температурою підсвічувального фону. Радіояскравісна температура металевого листа в усьому діапазоні кутів спостереження не перевищує 10 – 18 К, причому полірована поверхня випромінює слабше, ніж неполірована. Уявна температура не підвищується і під час нанесення на метал тонкого шару фарби. Можна зробити висновок, що металевий лист є своєрідним дзеркалом, у якому відбивається більш гаряче небо. За експериментальними даними на хвилі 8 мм уявна температура металевих об'єктів, розташованих на земній поверхні, є набагато нижчою, ніж у чотириміліметровому діапазоні, і не перевищує 50 К. Це пояснено нижчою радіояскравісною температурою неба у восьмиміліметровому діапазоні. Через це в сантиметровому діапазоні хвиль уявна температура наземних металевих об'єктів буде ще нижчою. Зауважимо, що уявна температура металевих об'єктів майже не залежить від їхньої фізичної температури, тому за допомогою радіотеплолокаторів не вдається відрізнити нагріті металеві об'єкти від холодних, що можливо, наприклад, за допомогою інфрачервоної апаратури.

Значно вищою (230 – 250 К) є уявна температура будівель і різних штучних споруд, виконаних із *неметалевих будівельних матеріалів*. Більшість цих матеріалів є діелектриками з великими втратами, тому їхній коефіцієнт випромінювання є порівняно великим.

Випромінювання *асфальтових і бетонних покриттів* є характерною ознакою багатьох військових, промислових і транспортних об'єктів

(доріг, злітно-посадкових смуг, ракетних позицій тощо). Оскільки ці покриття становлять плоскі та щодо гладкі поверхні, їхня уявна температура значно залежить від кута спостереження. Уявна температура асфальту може набувати значень від 100 до 300 К. Уявна температура бетону коливається в межах 0 – 290 К.

Важливою умовою, необхідною для виявлення об'єкта за його радіотепловим випромінюванням, є відмінність уявної температури об'єкта від уявної температури поверхні, на фоні якої його розташовано. Проведені дослідження радіотеплового випромінювання типових фонів земної поверхні показали, що уявні температури різних ділянок земної поверхні досить слабо залежать від довжини хвилі та виду поляризації.

Уявні температури ділянок земної поверхні, порослих лісом, сільськогосподарськими культурами, травою, не дуже значно відрізняються. Отже, у сантиметровому й міліметровому діапазонах хвиль ліс і трав'яний покрив випромінюють майже так само, як ідеальний випромінювач – абсолютно чорне тіло.

Випромінювання поверхневих випромінювачів досить значно залежить від ступеня їхньої вологості. Так, у дощову погоду уявна температура асфальтованих і бетонних покриттів зростає на 3 – 7 К. Оскільки фізична температура поверхні Землі змінюється під час зміни пір року та протягом доби, змінюються й уявні температури земної поверхні. Наприклад, у десятисантиметровому діапазоні максимальна уявна температура зимового лісу протягом доби змінюється від 227 К (7 год) до 243 К (16 год).

Уявна температура *водних поверхонь* (річок, озер, океанів, океану) значно залежить від кута спостереження, виду поляризації, ступеня хвилювання. Хвилі на поверхні води сприяють підвищенню її уявної температури, оскільки пінисті верхівки гребенів мають більш високий коефіцієнт випромінювання, ніж сама вода.

Як відомо, для радіолокаційного маскування металевих об'єктів можна застосовувати поглинальні покриття. Цілком очевидно, що радіотеплове маскування такі покриття не будуть забезпечувати, оскільки вони гарні радіотеплові випромінювачі.

Потужними джерелами радіотеплового випромінювання є *факели ракетних двигунів*. Під час роботи ракетного двигуна, унаслідок високої температури газів, що утворюються, їхні молекули інтенсивно іонізуються.

Утворювані під час іонізації вільні електрони різко підвищують електричну провідність газів. Факел водночас можна розглядати як провідне тіло з великими електричними втратами. Унаслідок цього коефіцієнт поглинання у факелі в сантиметровому й міліметровому діапазонах хвиль є досить великим (0,5 – 0,7); температура самого факела досягає значень 3 000 – 4 000 К. Звідси випливає, що радіояскравісна температура факела має значення 1 500 – 2 800 К, тобто, грубо кажучи, у 10 разів вищою, ніж для наземних об'єктів.

Під час зниження тиску навколишнього повітря густина електронів швидко падає, коефіцієнт поглинання, отже, зменшується. Зменшується він і з укороченням довжини хвилі.

Пропорційно коефіцієнту поглинання змінюється й радіояскравісна температура факела.

Під час горіння *палива* випромінювання полум'я відбувається не тільки через іонізацію газів – продуктів згоряння, а й унаслідок того, що в полум'ї міститься багато частинок незгорілого палива. Кожна така частинка є радіотепловим випромінювачем. Розміри випромінювальних частинок можуть бути різними – від тисячних до десятих часток міліметра; на хвилях приблизно такої самої довжини випромінювання буде найбільш інтенсивним – частинки якби налаштовуються в резонанс. Отже, уявна температура буде зростати з укороченням довжини хвилі. Найбільш інтенсивне випромінювання полум'я відбувається в міліметровому діапазоні хвиль.

Інтенсивне радіотеплове випромінювання створює *плазма*, що утворюється під час польоту різних об'єктів в атмосфері зі швидкостями, що в кілька разів перевищують швидкість звуку. Водночас поверхня тіла й прилеглий до неї шар повітря нагріваються до температури кілька тисяч градусів, і повітря в шарі, що містить частинки випаровуваної обшивки тіла, майже повністю іонізується, а нагрітий і сильно іонізований газ є гарним радіотепловим випромінювачем.

Важливою проблемою радіотеплолокації є поглинання теплового радіовипромінювання в атмосфері. Поглинання теплового радіовипромінювання істотно залежить від вибору робочого діапазону довжин хвиль, а також від умов їхнього поширення.

На рис. 11.2 наведено загасання радіохвиль сантиметрового й міліметрового діапазонів, а в табл. 11.2 – вікна прозорості та ділянки поглинання в цьому діапазоні.

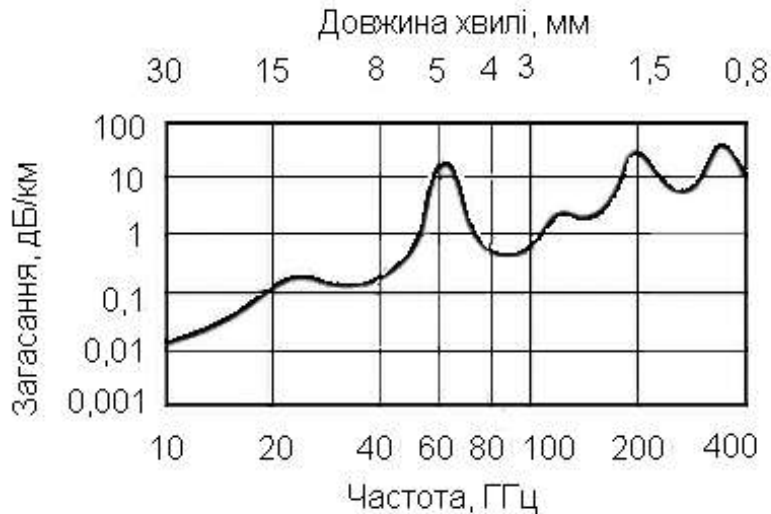


Рис. 11.2. Загасання радіохвиль сантиметрового й міліметрового діапазонів

Якщо говорити про умови поширення та їхній вплив на дальність дії системи, то можна навести такий приклад.

У ясну суху погоду різниця у коефіцієнтах ослаблення на частотах 20 і 100 ГГц становить 0,1 – 0,8 дБ/км, а під час невеликого дощу (2,5 мм/год) наближається до 16 дБ.

Таблиця 11.2

Вікна прозорості та ділянки поглинання в сантиметровому й міліметровому діапазонах

Піддіапазони, ГГц	Вікна прозорості		Ділянки поглинання	
	центральна частота, ГГц	центральна довжина хвилі, мм	центральна частота, ГГц	центральна довжина хвилі, мм
30,0 – 51,4 51,4 – 66,0	35,0	8,6	60,0	5,0
66,0 – 105,0 105,0 – 134,0	94,0	3,2	120,0	2,5
134,0 – 170,0 170,0 – 190,0	140,0	2,1	180,0	1,7
190,0 – 220,0 220,0 – 275,0	230,0	1,3	220	1,5

Найбільш значно змінюються характеристики систем інфрачервоного й радіочастотного діапазонів в умовах щільного туману (видимість 30 м).

У цьому разі ослаблення ІЧ-систем досягає близько 100 дБ/км, а для радіовипромінювань навіть на частоті 90 ГГц ця величина не перевищує 2 дБ/км.

11.4. Характеристики радіотеплових сигналів

Якщо помістити в поле радіотеплового випромінювання антену, то на її клеммах виникає шумоподібна напруга. Цю напругу було б не зовсім правильно називати радіотепловим сигналом, оскільки його частотний спектр є набагато ширшим, ніж смуги пропускання сучасних приймальних пристроїв. Приймач, підключений у цьому разі до антени, буде сприймати лише порівняно невелику ділянку спектра вхідної напруги, відповідну цій ділянці частину вхідної напруги й будемо називати *радіотепловим сигналом*. Із такого визначення випливає, що, на відміну від радіолокаційних сигналів, характеристики радіотеплового сигналу залежать від характеристик приймача. Так, потужність радіотеплового сигналу є прямо пропорційною ширині смуги пропускання приймача за високою (або проміжною) частотою. Саме тому в радіотеплолокації прагнуть застосовувати приймачі з дуже широкими смугами пропускання, що досягають сотень, тисяч і навіть десятків тисяч мегагерц. Водночас потужність радіотеплових сигналів підвищується і в деяких випадках може досягати значення $10 - 10^2$ Вт. Сигнал такої потужності є характерним, наприклад, для радіотеплолокаторів огляду земної поверхні. Для порівняння нагадаємо, що у РЛС далекого виявлення повітряно-космічних об'єктів потужність сигналів часто не перевищує 10 – 20 Вт.

Під час розрахунків часто зручно обчислювати інтенсивність сигналу не в одиницях потужності, а в одиницях спектральної густини. Така оцінка є більш об'єктивною, оскільки, на відміну від потужності, спектральна густина не залежить від смуги пропускання приймача. Як і під час обчислень спектральної густини випромінювання, спектральну густину радіотеплових сигналів обчислюють у температурних одиницях.

Спектральну густину і потужність сигналу пов'язано такими відношеннями:

$$P_c = kT_c \Delta f, \quad T_c = P_c / k \Delta f. \quad (11.8)$$

Величина kT_c становить *спектральну густину потужності сигналу*; величину T_c називають *температурою сигналу*, вона чисельно дорівнює фізичній температурі активного опору, що створює шумова напруга зі спектральною густиною, яка дорівнює спектральній густині потужності цього сигналу. Часто використовують також термін *антенна температура*. Тут мають на увазі температуру сигналу безпосередньо на виході антени.

Необхідно підкреслити, що, на відміну від шумів активних опорів, спектральна густина деяких радіотеплових сигналів залежить від частоти. Наприклад, температура сигналів від малорозмірних об'єктів підвищується зі зростанням частоти. Це явище може бути використано для селекції сигналів і розпізнавання їхніх джерел.

Ширина смуги частот, яку займає сигнал, є дуже важливою його характеристикою; від неї залежить не тільки потужність сигналу, але й точність вимірювання часу приходу сигналів у багатоканальних радіотеплолокаційних системах.

Тривалість радіотеплових сигналів залежить від тривалості перебування цілі в межах головної пелюстки ДС антени. Залежно від режиму огляду й характеру цілі тривалість сигналу може коливатися від одиниць мілісекунд до декількох хвилин. Енергія сигналу є пропорційною його тривалості, тому зі збільшенням тривалості поліпшуються можливості його виявлення й точність вимірювання амплітуди. У двоканальних радіотеплолокаторах збільшення тривалості сигналів сприяє підвищенню точності вимірювання різниці доплерівських зсувів частоти сигналів.

11.5. Особливості приймання радіотеплових сигналів

Основні труднощі під час приймання слабких сигналів пов'язано з необхідністю у їхньому виділенні на фоні власних шумів, створюваних першими каскадами приймачів. У зв'язувальних і радіолокаційних приймачах вплив власних шумів зменшують шляхом застосування частотної селекції й часового стробування. Водночас уже на виході високочастотної частини приймача може бути досягнуто достатнього перевищення потужності сигналу над потужністю шуму.

Під час приймання радіотеплових сигналів частотну селекцію й часове стробування застосовувати не можна, оскільки сигнали самі мають шумоподібний характер. Тому приймачі радіотеплових сигналів виконують

у вигляді точних вимірників рівня шуму. Такі приймачі прийнято називати **радіометрами**. Найпростіший радіометр (рис. 11.3) складається з підсилювача високої частоти (ПВЧ), детектора та згладжувального фільтра нижніх частот (ФНЧ), тобто становить звичайний приймач прямого підсилення.



Рис. 11.3. Функціональна схема найпростішого радіометра

Підсилювач високої частоти (ПВЧ) необхідний для ослаблення впливу шумів детектора й наступних каскадів, тому його власні шуми мають бути слабкими. Для підвищення потужності радіотеплового сигналу смугу пропускання ПВЧ прагнуть робити якомога ширшою. Із виходу ПВЧ посиленний радіотепловий сигнал надходить на квадратичний детектор. Вихідна напруга детектора, крім постійної складової, містить інтенсивну шумову складову, що маскує виділений корисний сигнал. Для заглушення цієї шумової складової й слугує ФНЧ, який у найпростішому випадку становить інтегрувальний RC-ланцюжок.

Основною особливістю найпростішого радіометра є його здатність надійно приймати сигнали, потужність яких є набагато нижчою за потужність власних шумів. Цю здатність обумовлено поєднанням широкої смуги пропускання за високою частотою та вузькою смугою пропускання після детекторного ФНЧ. Таке поєднання є характерним для більшості сучасних радіометрів.

Розгляньмо, як приклад, проходження сигналу й шуму через каскади найпростішого радіометра. На вході радіометра потужність сигналу й шуму є однаковими:

$$P_c = kT_c \Delta f, P_{ш} = kT_{ш} \Delta f = k(l - 1)T_c \Delta f, \quad (11.9)$$

де $T_c = (Ш - 1) / T_c$ – шумова температура ПВЧ;

$T_{ш} = 300 \text{ К}$ – стандартна температура;

$Ш$ – коефіцієнт шуму ПВЧ.

Відношення потужності сигналу до потужності шуму на вході радіометра є таким:

$$q_{\text{вх}} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = \frac{T_c}{T_{\text{ш}}}. \quad (11.10)$$

Неважко переконатися, що відношення потужності сигналу до потужності шуму (для стислості будемо називати його просто відношенням сигнал/шум) не зміниться після посилення за високою частотою:

$$q_{\text{ПВЧ}} = \frac{P_c K_{\text{ПВЧ}}}{P_{\text{ш}} K_{\text{ПВЧ}}} = \frac{T_c}{T_{\text{ш}}} = q_{\text{вх}}. \quad (11.11)$$

Фізичний сенс полягає в тому, що ПВЧ однаково посилює і власні шуми, і шумоподібний сигнал. Навіть у разі застосування малошумливих ПВЧ температура їхніх шумів, зазвичай, значно перевищує температуру сигналу; отже, відношення сигнал/шум на вході детектора є меншим за одиницю. Водночас у детекторі відбувається заглушення сигналу шумом і відношення потужності продетектованого сигналу (постійної складової) до потужності шумів на виході детектора буде таким:

$$q_{\text{дет.}} \approx q_{\text{ПВЧ}}^2 = q_{\text{вх}}^2 = \left(\frac{T_c}{T_{\text{ш}}} \right)^2. \quad (11.12)$$

Звернімо увагу на те, що шум на виході детектора зберігає свій широкосмуговий характер, але його спектр переноситься в ділянку нижніх частот (рис. 11.4).

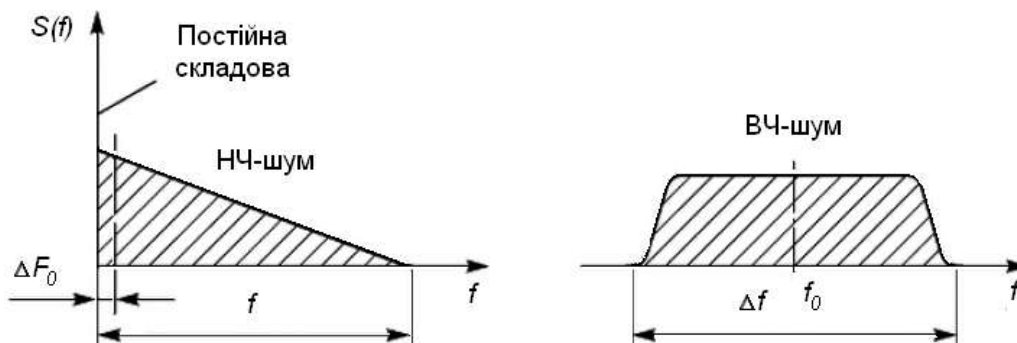


Рис. 11.4. Вплив ширини смуги пропускання за ВЧ і НЧ на рівень шуму на виході радіометра

Дійсно, високочастотний шум до детектування можна розглядати як результат модуляції носійної низькочастотних шумів зі спектром, що перебуває в межах $0 - \Delta f$; у результаті детектування і виділяється цей модульований шум. ФНЧ має смугу пропускання ΔF значно меншу, ніж смуга пропускання Δf . ПВЧ пропустить лише малу частку цього шуму, не перешкоджаючи водночас проходженню корисної постійної складової.

Потужність шуму на виході ФНЧ у $\Delta f / \Delta F$ раз є нижчим за потужність шуму на вході ФНЧ. Отже, вихідне відношення сигнал/шум є таким:

$$q_{\text{в}} \approx q_{\text{дет.}} \frac{\Delta f}{\Delta F} \approx \left(\frac{T_c}{T_{\text{ш}}} \right)^2 \frac{\Delta f}{\Delta F} = q_{\text{вх}}^2 \frac{\Delta f}{\Delta F}. \quad (11.13)$$

У сучасних радіометрах відношення $\Delta f / \Delta F$ досягає $10^7 - 10^9$, що забезпечує здобування великого вихідного відношення сигнал/шум за вхідного, меншого за одиницю. Однак безмежне збільшення вихідного відношення сигнал/шум через звуження смуги пропускання ФНЧ є неможливим, унаслідок обмеженої тривалості радіотеплового сигналу.

Як відомо, у результаті детектування такого сигналу утворюється імпульс постійної напруги, спектр якого займає смугу частот $0 - F_c$, а ширина її є обернено пропорційною тривалості сигналу $\Delta F_c = F_c \cong 1/t_c$.

Під час звуження смуги ФНЧ до значення меншого, ніж ΔF_c , разом із шумами буде заглушуватися і сигнал, тобто збільшення відношення сигнал/шум не буде. Отже, досягне найбільше відношення сигнал/шум буде таким:

$$q_{\text{в}} \approx \left(\frac{T_c}{T_{\text{ш}}} \right)^2 \Delta f \cdot t_c. \quad (11.14)$$

Зауважимо, що ф-ла (11.14) є справедливою тільки для ідеалізованого найпростішого радіометра, у якого немає втрат сигналу на ділянці від виходу антени до входу приймача; частотна характеристика ПВЧ має прямокутну форму, детектор квадратичний, а ФНЧ ідеально погоджено із тривалістю та формою обвідного сигналу. Тому в реальних радіометрах за таких самих значень T_c , $T_{\text{ш}}$, Δf , t_c вихідне відношення сигнал/шум у 5 – 10 разів є меншим, ніж в ідеалізованого радіометра.

Основною технічною характеристикою будь-якого радіометра є *чутливість*. Вона характеризує здатність радіометра приймати слабкі радіотеплові сигнали. Чутливість радіометра чисельно дорівнює температурі сигналу, під час подавання якого на вхід вихідне відношення сигнал/шум дорівнює одиниці. Формулу чутливості найпростішого радіометра легко визначити з ф-ли (11.14), прирівнявши її праву частину до одиниці:

$$\delta T = \frac{T_{\text{ш}}}{\sqrt{\Delta f \cdot t_c}}. \quad (11.15)$$

Один з основних принципів побудови радіометричних приймачів – використання у вхідних ланцюгах підсилювачів із низьким рівнем шуму – малошумних підсилювачів (МШП). Застосування в першому каскаді підсилювача з низькою шумовою температурою та великим коефіцієнтом посилення сприяє різкому зниженню шумової температури приймача, навіть якщо такі каскади мають високі шумові температури. Крім того, під час використання МШП у ряді випадків відпадає необхідність використовувати супергетеродинне приймання. Основними типами МШП є такі:

- спеціальні лампи біжучої хвилі (ЛБХ);
- параметричні підсилювачі;
- квантово-механічні підсилювачі (КМП);
- підсилювачі на тунельних діодах.

Сучасні серійні ЛБХ трисантиметрового діапазону мають шумові температури 900 – 1 000 К і смугу пропускання, що дорівнює 20 – 30 % носійної. Під час використання таких ЛБХ у вхідних каскадах радіометрів забезпечено чутливість, яка дорівнює кільком сотим градуса.

Вельми перспективними вважають *параметричні підсилювачі*, особливо параметричні підсилювачі на напівпровідникових приладах. Сучасні підсилювачі цього типу мають шумові температури 80 – 100 К, а охолоджувані до 50 К за коефіцієнта посилення 10 – 20 дБ і смуги пропускання 50 – 100 МГц.

Найнижчі шумові температурами мають КМП – близько 10 К. Їхнє застосування в окремих випадках дозволяє знизити шумову температуру радіометра до 15 К.

Підсилювачі на тунельних діодах відрізняються схемною простотою, економічністю, високою надійністю, стійкістю до зовнішніх впливів.

Нині освоєно випуск тунельних діодів, що забезпечують шумові температури близько декількох сотень градусів під час роботи в сантиметровому діапазоні та довгохвильовій частині міліметрового діапазону. Подальше зниження шумових температур є можливим шляхом охолодження діодів до низьких температур. Так, під час охолодження підсилювача до температури рідкого азоту його шумова температура знижується майже у 2 рази.

Якість приймача радіотеплового випромінювання, крім чутливості, визначено також *кутовою роздільною здатністю*, яка залежить від ширини головної пелюстки ДС антени:

$$\Theta = \lambda / d, \quad (11.16)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання;

d – розмір апертури (розкриття) антени.

З огляду на те, що радіохвилі є набагато порядків довшими за оптичні, кутова роздільна здатність навіть за дуже великого розкривання антени не перевищує кутової роздільної здатності неозброєного ока.

Для оптимізації параметрів радіометра (чутливості, роздільної здатності) використовують два види пристроїв: із повною і незаповненою апертурою.

Радіометри з *повною апертурою* збирають енергію радіо-теплого випромінювання зі всієї геометричній площі антени. До таких антен належать дзеркальні антени й антенні ґратки, що складаються з диполів.

Найбільш поширеними є радіометри із *дзеркальними параболічними та сферичними антеннами*, які збирають паралельний пучок променів, що падають на антену, у фокусі, де розташовують опромінювач. Такі антени дозволяють приймати радіовипромінювання аж до сантиметрових і навіть міліметрових хвиль.

На відміну від параболоїда, *сферичне дзеркало* збирає енергію в певному обсязі (через сферичну аберацію) та для фокусування випромінювання в одну точку застосовують вторинне дзеркало. Перевага сферичного дзеркала полягає в тому, що воно може бути нерухомим, отже, більш точним. Зміну напрямку (під час сканування) у цьому разі здійснюють переміщенням вторинного дзеркала з опромінювачем, тобто для роботи використовують різні ділянки сферичного дзеркала.

Окремим випадком дзеркальної антени є перископічна система з усіченим параболічним, або сферичним дзеркалом, із плоским перевідбивним дзеркалом. Промінь кутом місця переміщається за допомогою плоского дзеркала, а азимутальною площиною – опромінювача.

Оптимальне відношення чутливості й кутової роздільної здатності було встановлено для пристроїв із *незаповненою апертурою*. Найпростішою системою цього типу є *радіоінтерферометр*, що складається із двох невеликих антен, рознесених на велику відстань одна від одної та з'єднаних між собою високочастотним кабелем. Радіоінтерферометр має багатопелюсткову діаграму спрямованості. Ширину пелюстки визначено відстанню B між антенами.

Кутова роздільна здатність пристрою у цьому разі залежить від цієї відстані:

$$\Theta_p = \lambda / B. \quad (11.17)$$

На відміну від звичайного радіометра, інтерферометр вимірює не температуру яскравості, а одну з гармонік у спектрі просторових частот розподілу радіояскравості. Номер гармоніки, вимірюваної інтерферометром, визначено довжиною бази B . Спостерігаючи джерело на радіоінтерферометрі, одна з антен якого займає послідовно різні точки на великій площі (заповнює апертуру), можна виміряти весь спектр просторових частот, що характеризують розподіл радіояскравості об'єкта. Потім із цього спектра відновлюється (зворотним перетворенням Фур'є) розподіл радіояскравості об'єкта з кутовою роздільною здатністю, що відповідає кутовій роздільній здатності пристрою з апертурою, створеною синтезом послідовних вимірювань у всіх її точках.

Пристрої апертурного синтезу набули значного поширення, із їхньою допомогою досягнуто високу роздільну здатність.

У техніці радіотеплолокації часто виникає необхідність у порівнюванні двох або декількох сигналів. Водночас із сигналів може бути здобуто додаткову інформацію, наприклад, встановлено факт руху цілі та визначено її кутові координати, що є неможливим під час використання найпростішого радіометра. Радіометри, призначені для спільного приймання двох радіотеплових сигналів, називають *кореляційними* (рис. 11.5а). Як впливає з рис. 11.5 основною відмінністю кореляційного радіометра

від найпростішого є наявність двох ПВЧ і схеми перемноження сигналів, замість квадратичного детектора.

Якщо на входи ПВЧ надходить один і той самий радіотепловий сигнал, то кореляційний радіометр працює так само, як і найпростіший, оскільки множення двох однакових сигналів є еквівалентним квадратичному детектуванню будь-якого з них. Однак якщо один із вхідних сигналів затримується щодо другого, то вихідна напруга буде знижуватися й дорівнювати нулю за щодої затримки сигналів t_3 , що дорівнює чверті періоду середньої частоти сигналу.

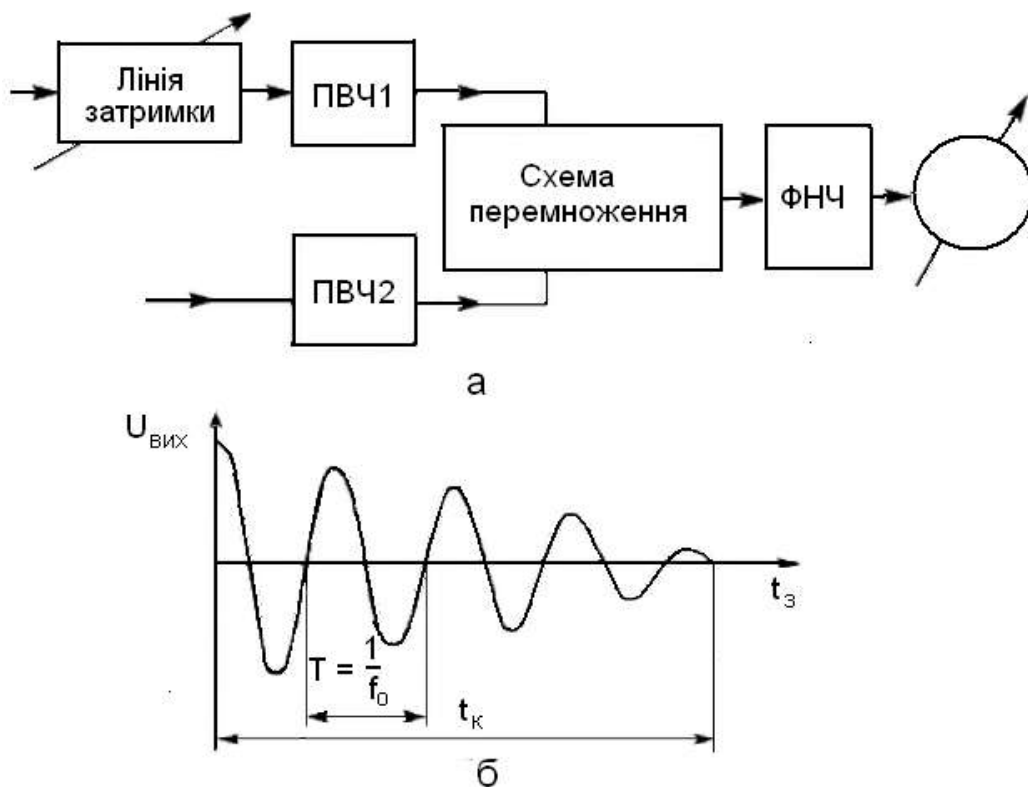


Рис. 11.5. Кореляційний радіометр:
а – блок-схема; б – залежність вихідної напруги від часу затримки

Із подальшим збільшенням затримки вихідна напруга змінює знак і зростає аж до моменту, коли t_3 дорівнює напівперіоду середньої частоти; потім знову знижується, переходить через нуль, набуває позитивного значення тощо. Інакше кажучи, у разі безперервної зміни t_3 вихідна напруга періодично набуває додатних і від'ємних значення. Такий характер

зміни напруги пояснено тим, що схема множення насправді є фазовим детектором, а різниця фаз сигналів пропорційною їхній часовій затримці.

Залежність вихідної напруги від t_3 наведено на рис. 11.5б. Звертає на себе увагу та обставина, що із підвищенням t_3 величина максимумів поступово зменшується; за $t_3 = 1 / \Delta f$ вихідна напруга, певніше його постійна складова, дорівнює нулю. Це пов'язано із шумоподібним характером вхідного сигналу. Оскільки його частота безперервно та випадково змінюється, то відрізки сигналу на інтервалі, більшому ніж $1 / \Delta f$, будуть мати частоти, які відрізняються, а сигнали з різними частотами не можуть створити постійної напруги на виході фазового детектора.

Також зазначимо, що залежність $U_{\text{вих.}} = f(t_3)$, зображена на рис. 11.5б становить не що інше, як функцію автокореляції сигналу, що є важливою його характеристикою. Інтервал $t_k = 1 / 1 / \Delta f$, відповідний спаду функції автокореляції до певного дуже малого значення, називають *інтервалом кореляції*. Зауважимо, що якщо однакові сигнали зрушено на час, більший ніж t_k , то кореляційним радіометром їх не фіксують. Не фіксують та одночасно надходять від різних джерел радіотеплові сигнали, оскільки їхні миттєві частоти змінюються за різними законами.

Для вимірювання часу щодої затримки сигналів, що надходять на 1-й і 2-й входи радіометра, використовують лінію зі змінним часом затримки (див. рис. 11.5а). Час затримки сигналу в лінії змінюють доти, поки вихідна напруга радіометра не стане максимальною. Час затримки сигналу в лінії водночас є таким, що дорівнює часу щодої затримки сигналів.

За допомогою кореляційного радіометра можна вимірювати також зсув частоти сигналів. Така необхідність виникає, наприклад, під час приймання радіотеплових сигналів рухомих цілей на рознесені у просторі антени. Сигнали на виходах антен водночас мають різний доплерівський зсув, і цю різницю зсувів, що характеризує швидкість цілі та відстань до неї, може бути виміряно кореляційним радіометром. У цьому разі замість ФНЧ до виходу радіометра підключають смугові ФНЧ, смуги пропускання яких перекривають можливий діапазон змін різницевого доплерівського зрушення.

Для обчислення відношення сигнал/шум і чутливості кореляційного радіометра з деяким наближенням може бути використано ті самі формули, що й для найпростішого радіометра. Необхідно, однак, ураховувати, що потужність шумів у кореляційному радіометрі є вдвічі вищою, ніж

у простому. Тому під час використання кореляційного радіометра в одно-каналному режимі вихідне відношення сигнал/шум є меншим у 4 рази, а чутливість – у 2 рази, порівняно з найпростішим радіометром.

11.6. Радіотеплові сигнали як передавачі інформації

Призначення будь-якої локаційної системи зведено до здобування певних видів інформації про ціль. Передавачами цієї інформації є сигнали, у параметрах яких закодовано координати й характеристики цілей. Так, інформацію про дальність до цілей кодують у часову затримку сигналів, швидкість цілей визначає доплерівський зсув частоти сигналу, інтенсивність сигналу в деяких випадках характеризує розміри цілі тощо. Природно, що кращими є ті локаційні системи, які дозволяють здобувати про цілі більший обсяг інформації.

Обсяг інформації, яку може передавати сигнал, істотно залежить від його властивостей. Теоретичними й експериментальними дослідженнями встановлено, що цей обсяг є пропорційним добутку смуги частот сигналу на його тривалість, а для здобування найбільшої інформації про декілька цілей необхідно, щоб сигнали від цих цілей були взаємонеzáлежними.

Радіотеплові сигнали задовольняють ці вимоги більшою мірою, ніж радіолокаційні. Радіолокаційні сигнали значно поступаються радіотепловим за широкосмуговістю, а вимогу взаємної незалежності не задовольняють принципово, оскільки мають спільне джерело – генератор випромінювання, яке підсвічує ціль. Отже, за допомогою радіотеплових сигналів можна здобути більше інформації про цілі, ніж за допомогою радіолокаційних. Однак тут треба розуміти, що для ефективного здобування інформації із прийнятих сигналів їх треба порівнювати з опорними. Наприклад, у радіолокації так визначають дальність до цілей і їхню швидкість.

У радіотеплолокації використання опорних сигналів є неможливим, оскільки їхніми джерелами є власне цілі. Тому в радіотеплолокації доводиться або використовувати більш складні (засновані на взаємному порівнюванні) методи оброблення сигналів, що приймають на рознесені у просторі антени, або примиритися зі втратою частини інформації. Нині найбільшого поширення набули прості одноканальні радіотеплолокатори,

що вимірюють лише середню потужність сигналів і кутові координати цілей. Такими радіотеплолокаторами не можна визначати дальність і швидкість цілі, однак можна вельми точно вимірювати інтенсивність випромінювання цілей, що є недоступним для радіолокаторів.

Отже, у цьому разі інформаційну надмірність радіотеплового сигналу витрачено на підвищення точності вимірювання потужності сигналів. Ще більша перевага радіотеплового сигналу наявна у двоканальних радіотеплолокаторах, якими можна визначати дальність до цілей і їхню швидкість.

Отже, методи здобування інформації, зокрема методи визначення дальності та швидкості, прийняті в радіотеплолокації, відрізняються від радіолокаційних. Певний виняток становлять лише методи визначення кутових координат, які, як і радіолокаційні, засновано на використанні гостроспрямованих антен.

Енергетичні співвідношення в радіотеплолокації. Визначмо максимально досяжне значення температури радіотеплового сигналу. Нехай S – загальна розсіювальна площа. Тоді потік потужності випромінювання від маленької площадки ΔS_1 (складової S), що падає на приймальну антену, буде таким:

$$\Delta P = \frac{2\pi k T_{\text{я}} \Delta S_1}{\lambda^2} \cdot \frac{1}{\pi D^2} = \Delta P_1 \frac{1}{\pi D^2}, \quad (11.18)$$

де ΔP_1 – потужність радіотеплового випромінювання у смузі 1 Гц із площадки ΔS_1 . На виході антени потік потужності ΔP_1 створює сигнал такою потужністю:

$$\Delta P_{a1} = \Delta P_1 A = \frac{k T_{\text{я}} G \Delta S_1}{4 \pi D^2}, \quad (11.19)$$

де $A = G \lambda^2 / 4 \pi$ – ефективна площа антени під час роботи на приймання.

Для того щоб визначити потужність повного сигналу від усієї площі S , треба підсумувати сигнали від усіх площадок ΔS . Потужність буде пропорційною площі S :

$$P_a = \frac{k T_{\text{я}} G S}{4 \pi D^2}. \quad (11.20)$$

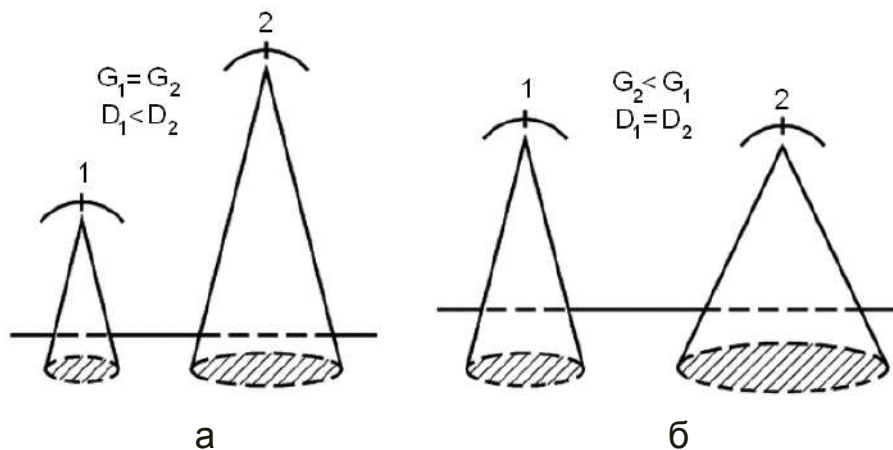
Щоб визначити остаточно формулу, укажемо, що $\frac{S}{D^2}$ становить тілесний кут, займаний пелюсткою діаграми спрямованості. Значення цього тілесного кута пов'язано з коефіцієнтом спрямованої дії таким співвідношенням:

$$\Omega_{\text{ант.}} = \frac{S}{D^2} = \frac{4\pi}{G}. \quad (11.21)$$

Останній вираз означає, що коефіцієнт спрямованої дії (КСД) показує, у скільки разів головна пелюстка є більш вузькою за повний тілесний кут, що дорівнює 4π стерадіан. Виконавши підстановку, визначаємо:

$$P_a = k T_a = k T_{\text{я}}, \quad T_a = T_{\text{я}}, \quad (11.22)$$

тобто температура радіотеплового сигналу на виході антени дорівнює уявній температурі випромінювача й не залежить від дальності та спрямованих властивостей антени. Справедливість цього підтверджує рис. 11.6.



**Рис. 11.6. Приймання випромінювання цілі великої площі:
а – на різних відстанях; б – на антени з різними КСД**

Дійсно, збільшивши відстань до об'єкта, наприклад у два рази, визначимо 4-кратне збільшення площі S , тобто ту саму потужність і температуру сигналу. Із рис. 11.6 випливає, що не можна визначити приріст температури сигналу й за допомогою КСД, оскільки водночас площа S зменшується та величини P_a і T_a залишаються незмінними. Підвищити T_a

понад значення T_a не вдається ніякими іншими способами; не допомагає тут і паралельне підключення декількох антен.

Рівність (11.22) засновано на фізичному принципі, безпосередньо пов'язаному із другим законом термодинаміки: його порушення стверджувало б, що можна нагріти опір навантаження антени від холодного джерела випромінювання, тобто створити вічний двигун другого роду.

Отже, рівність (11.22) дає значення граничної температури радіотеплового сигналу, перевершити яке ніякими способами є неможливим.

Для реальних антен рівність (11.22) набуває такого вигляду:

$$T_a = \eta(1 - \beta)T_k, \quad (11.23)$$

де η – ККД антени;

β – коефіцієнт розсіювання, що характеризує вплив бічних пелюсток ДС.

Із виразу (11.23) випливає, що для реальних антен температура сигналу завжди є нижчою за уявну температуру випромінювача.

11.7. Структурні схеми радіотеплолокаторів

Функціональну схему оглядового радіотеплолокатора (РТЛ) наведено на рис. 11.7.



Рис. 11.7. Функціональна схема оглядового РТЛ

Як впливає з рис. 11.7, ця схема містить ті самі елементи, що й функціональна схема оглядової РЛС, за винятком передавача, антенного перемикача та синхронізатора.

В оглядових РТЛ найчастіше застосовують антени із ДС голчастого типу; це забезпечує можливість визначення двох кутових координат цілі, але дещо ускладнює привідні пристрої антен. У РТЛ можна застосовуватися різні види огляду: рядковий (растровий), спіральний, циклоїдальний.

Особливе місце посідає так званий однорядковий огляд, застосовуваний у бортових оглядових РТЛ.

Типову схему огляду повітряного простору РТЛ наведено на рис. 11.8. Тут t_p – однорядковий час огляду.

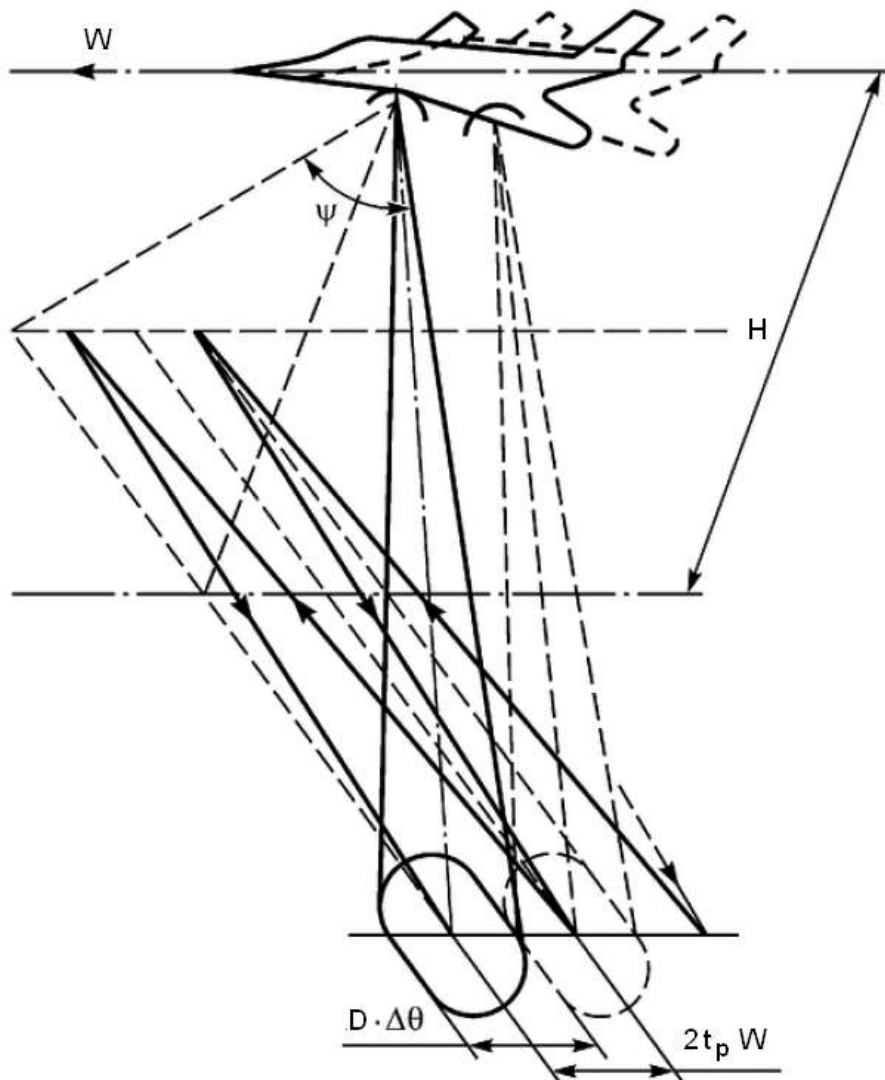


Рис. 11.8. Однорядковий огляд

За однорядкового огляду голчастий антенний промінь сканують у площині, перпендикулярній осі літального апарата, забезпечуючи огляд по обидва боки від траєкторії польоту. Огляд уздовж напрямку польоту здійснюють за допомогою руху літального апарата.

На рис. 11.9 наведено схему растрового огляду повітряного простору.

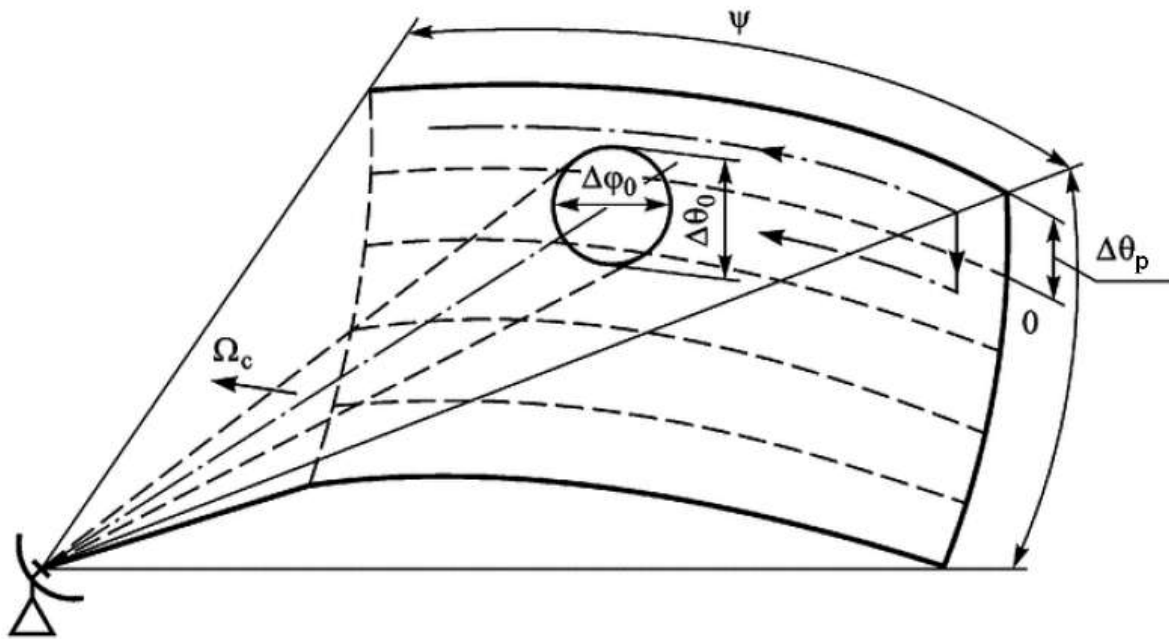


Рис. 11.9. Растровий огляд

Основними характеристиками оглядового РТЛ є дальність дії та роздільна здатність.

Дальність дії РТЛ для огляду повітряного простору може бути визначено за такою формулою:

$$D = 0,135 \sqrt{\frac{\delta T_{\text{ц}} S_{\text{ц}}}{\Delta T q_m}} \sqrt[4]{\frac{T_{\text{огл.}}}{\psi \theta \Delta \phi \Delta \theta}}, \quad (11.24)$$

де $\delta T_{\text{ц}} = T_{\text{ц}} - T_{\text{ф}}$ – радіояскравісний контраст цілі та фону, К;

$S_{\text{ц}}$ – площа цілі, м²;

ΔT – чутливість радіометра, К;

q_m – вхідне відношення сигнал/шум, відповідне заданій надійності (коефіцієнт розрізнюваності);

$T_{\text{огл.}}$ – заданий час огляду зони, с;

ψ, θ – кутові зони огляду за азимутом і кутом місця, град;

$\Delta\varphi, \Delta\theta$ – ширина діаграми спрямованості за азимутом і кутом місця, град.

Кути огляду діаграми спрямованості в цьому разі беруть за нульовий рівень. Розрахунки за ф-лою (11.24) показують, що дальність дії оглядових радіотеплолокаторів може бути досить великою.

Здебільшого дальність дії обмежено не чутливістю радіометра, а нерівномірністю уявної температури фону, які у процесі огляду створюють додатковий шум подібно до флуктуацій коефіцієнта посилення радіометра. Деяке поліпшення може бути досягнуто шляхом застосування спеціальних низькочастотних фільтрів, що відокремлюють короткі сигнали малорозмірних цілей від більш тривалих викидів, викликаних неоднорідностями фонового випромінювання.

Другий спосіб компенсації шкідливого впливу фонових неоднорідностей засновано на використанні запису вихідної напруги радіометра протягом декількох циклів огляду. За допомогою спеціального пристрою запису сусідніх циклів огляду попарно віднімають, у результаті віднімання фон компенсують, а запис корисного сигналу зберігають.

Оглядовий радіотеплолокатор описаного типу призначено для огляду повітряного простору. Трохи відмінний пристрій мають бортові радіотеплолокатори огляду земної поверхні. У цих радіотеплолокаторах використовують режим однорядкового огляду (див. рис. 11.8) і дальність дії будуть обчислювати за іншою формулою:

$$D \approx 0,12 \sqrt[3]{\left(\frac{\delta T_{\text{ц}} S_{\text{ц}}}{\Delta T q_m}\right)^2 \frac{1}{W \psi \theta \Delta \varphi \Delta \theta}}. \quad (11.25)$$

Ця формула відрізняється від ф-ли (11.24): по-перше, виникла залежність від швидкості польоту; по-друге, сильніший вплив ширини ДС антени, контрасту та площі цілі, що пояснено більш складною залежністю тривалості сигналу від величин $\Delta\varphi, \Delta\theta$ і ψ .

Важливим параметром РТЛ огляду земної поверхні є його *роздільна здатність*, тобто мінімальна відстань між двома цілями на місцевості,

за якої ці цілі ще спостерігають окремо. Значення роздільної здатності залежить від ширини ДС та дальності до цілей так:

$$\Delta L_{\text{аз.}} = D \sin \Delta \varphi \approx D \Delta \varphi; \quad \Delta L_{\text{кут.м.}} = D \frac{\sin \Delta \theta}{\cos(\psi / 2)} \approx D \frac{\Delta \theta}{\cos(\psi / 2)}. \quad (11.26)$$

У разі збільшення дальності азимутальна роздільна здатність погіршується швидше, отже, на краях зони огляду детальність здобутого зображення земної поверхні буде гіршою, ніж у середині.

Найкращою роздільна здатність буде за нульового азимутного кута, і вона дорівнює:

$$\Delta L_{\text{аз.}} = H \sin \Delta \varphi \approx H \Delta \varphi; \quad \Delta L_{\text{кут.м.}} = H \frac{\sin \Delta \theta}{\cos(\psi / 2)} \approx H \frac{\Delta \theta}{\cos(\psi / 2)}. \quad (11.27)$$

Це означає, що найбільш чітко буде відтворено ділянки місцевості безпосередньо під літальним апаратом, на якому встановлено РТЛ. Це є серйозною перевагою оглядового РТЛ перед панорамними бортовими радіолокаторами, у яких, як відомо, на малих дальностях дозвіл є дуже низьким.

Зауважимо також, що за невеликих відстаней і досить вузьких ДС роздільна здатність РТЛ становить одиниці метрів і менше, що практично є недосяжним для радіолокаторів.

11.7.1. Багатоканальні оглядові радіотеплолокатори

Розширення зони зменшує дальність дії радіотеплолокаторів. Крім того, із розширенням зони зростає час огляду, що часто буває небажаним.

Для усунення цього недоліку радіотеплолокатори роблять багатоканальними, водночас загальну зону огляду розподіляють на кілька зон меншого розміру.

Якщо замість одного каналу взяти n одночасно діючих каналів, то дальність дії оглядового РТЛ із багатоканальним оглядом збільшиться в $n^{1/4}$, а дальність дії бортового оглядового РТЛ – у $n^{1/3}$ разів. Необов'язково робити кожен канал у вигляді самостійного РТЛ.

Сучасна техніка дозволяє конструювати антени з декількома рознесеними діаграмами спрямованості. Такі антени використовують у багатоканальних РТЛ.

Індикаторний пристрій також може бути загальним. Необхідні лише кілька окремих радіометрів.

Важливою перевагою багатоканальних РТЛ є їхня підвищена надійність, оскільки під час виходу з ладу одного каналу багатоканальний РТЛ зберігає працездатність за допомогою справних. Якщо взяти кількість каналів великою, то можна здійснювати огляд простору без сканування (рис. 11.10).

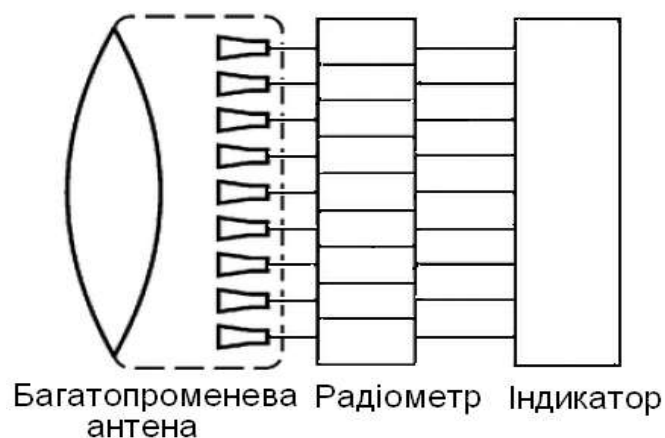


Рис. 11.10. Принцип радіобачення

Такий спосіб огляду називають **радіобаченням**. Термін "радіобачення" не є випадковим. Справа в тому, що радіотеплове випромінювання так само, як і світлове, є некогерентним і широкосмуговим. Тому радіотеплові зображення ділянок місцевості значно нагадують зображення цих самих ділянок, видимі оком.

Радіобачення – це складна технічна проблема, головним чином, тому що необхідна кількість приймальних каналів є дуже великою – сотні або навіть тисячі.

11.7.2. Спостережні радіотеплолокатори

Спостережні радіотеплолокатори призначено для автоматичного супроводження одиночних радіотеплових цілей за кутовими координатами.

Принцип дії та функціональна схема спостережних РТЛ є багато в чому схожими із принципом дії та функціональними схемами спостережних радіолокаторів.

Найчастіше у спостережних РТЛ застосовують конічне сканування. Функціональну схему такого РТЛ наведено на рис. 11.11.

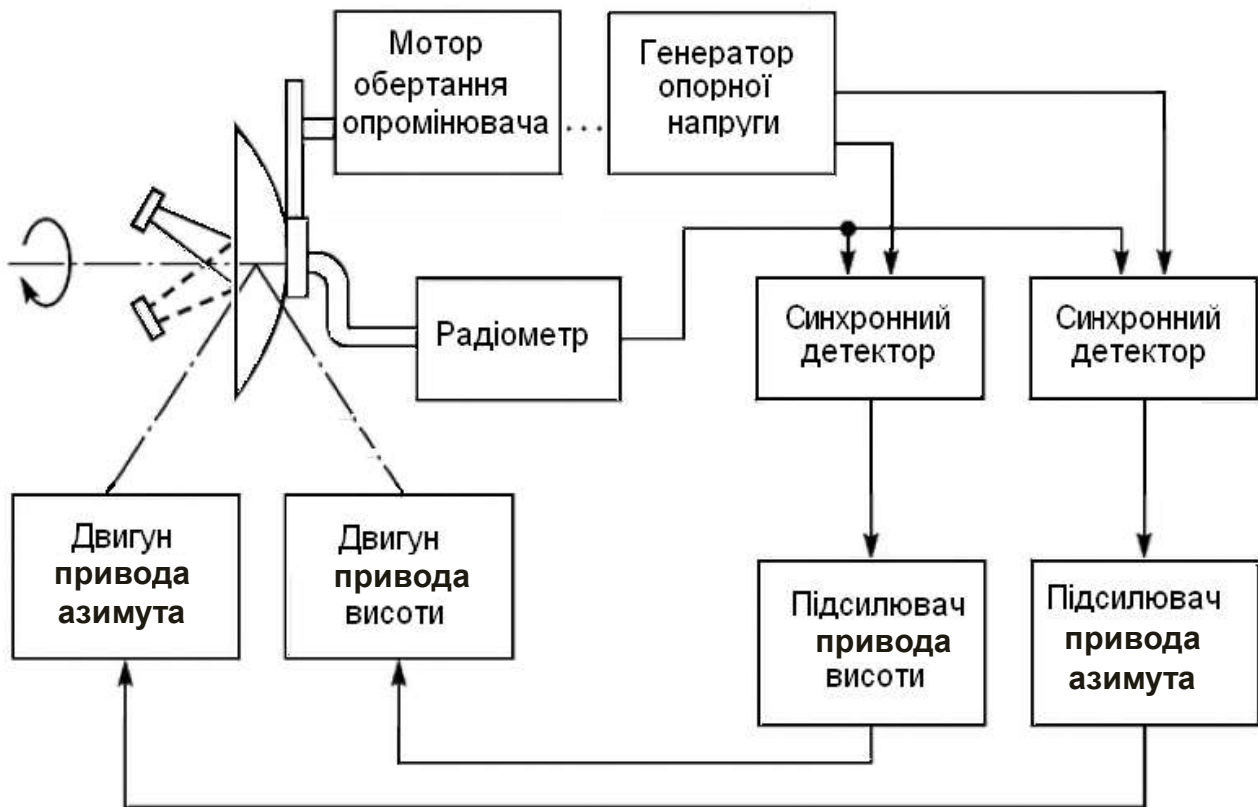


Рис. 11.11. **Функціональна схема спостережного РТЛ із конічним скануванням**

Як і у спостережному радіолокаторі, вхідний сигнал є промодульованим за амплітудою шляхом обертання ДС, причому глибина модуляції зростає під час віддалення джерела випромінювання від осі обертання, а фазу модуляції визначають напрямком зміщення джерела. У спостережному РТЛ немає необхідності застосовувати модуляційний радіометр, оскільки сигнал, що приймають, уже промодульовано, тому після детектування сигнал подається на вузькосмуговий ПНЧ, налаштований на частоту модуляції, до виходу якого підключено синхронні детектори.

На виходах синхронних детекторів формуються постійні напруги, пропорційні значенням кутової непогодженості між віссю обертання ДС і напрямком на пеленговане джерело. Ці напруги й використовують для управління приводними механізмами антени, забезпечуючи тим самим автоматичне супроводження пеленгованого джерела радіотеплового випромінювання.

Основні характеристики спостережного РТЛ – дальність дії та точність визначення кутових координат.

Формули для визначення дальності дії РТЛ і помилки кутового супроводження мають, відповідно, такий вигляд:

$$D \approx 0,1 \sqrt{\frac{\delta T_{\text{ц}} S_{\text{ц}}}{\Delta T q_m \Delta \varphi \Delta \theta}} \sqrt[4]{t_c}; \quad (11.28)$$

$$\sigma_{\varphi} \approx 0,4 \frac{\Delta \varphi_{0,5}}{q_m \sqrt{t_c}}, \quad (11.29)$$

де t_c – тривалість сигналу (час перегляду одного елемента);

σ_{φ} – середньоквадратична помилка кутового супроводження, обумовлена дією власних шумів радіометра РТЛ.

Контрольні запитання

1. На чому засновано радіотеплову розвідку?
2. Що становить реальний радіотепловий сигнал, який випромінює об'єкт?
3. Яким є один із найбільш важливих законів теплового випромінювання?
4. Який випромінювач називають абсолютно чорним тілом?
5. Від чого, крім поглинальних властивостей речовини випромінювача, залежить інтенсивність радіотеплового випромінювання?
6. Чому дорівнює радіояскравісна температура випромінювача?
7. Від чого залежить потужність радіотеплового випромінювання?
8. Що називають радіотепловим сигналом?
9. Як пов'язано спектральну густину і потужність сигналу?

10. Які приймачі прийнято називати радіометрами?
11. Чому використання опорних сигналів є неможливим у радіотеплолокації?
12. Які антени найчастіше застосовують в оглядових РТЛ?
13. За якого азимутного кута буде найкращою роздільна здатність сучасної РТЛ?
14. Що є важливою перевагою багатоканальних РТЛ?
15. Який спосіб огляду називають радіобаченням?
16. Як забезпечують автоматичне супроводження пеленгованого джерела радіотеплового випромінювання?
17. Які напруги використовують для управління приводними механізмами антени спостережного РТЛ?

Використана та рекомендована література

1. Анин Б. Ю. Защита компьютерной информации / Б. Ю. Анин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2000. – 384 с.
2. Анисимов В. М. Практический курс физики. Основы квантовой физики / В. М. Анисимов, О. Н. Третьякова ; под ред. Г. Г. Спирина. – Москва : Изд. МАИ ; Наука, 2008. – 163 с.
3. Ахманов С. А. Физическая оптика : учебник / С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин. – 2-е изд. – Москва : Изд МГУ ; Наука, 2004. – 656 с.
4. Бондаренко О. О. Электрика та магнетизм : практикум з навч. дисц. "Фізика" / О. О. Бондаренко, О. М. Гоков, К. О. Катрунов. – Харків : ХНЕУ, 2009. – 266 с.
5. Бондаренко О. О. Оптика : практикум з навч. дисц. "Фізика" / О. О. Бондаренко, О. М. Гоков, К. О. Катрунов. – Харків : ХНЕУ, 2011. – 277 с.
6. Бузов Г. А. Защита от утечки информации по техническим каналам : учеб. пособ. / Г. А. Бузов, С. В. Калинин, А. В. Кондратьев. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2005. – 416 с.
7. Гурвич И. И. Сейсмическая разведка / И. И. Гурвич, Г. Н. Боганик. – Москва : Недра, 1980. – 178 с.
8. Элементы квантової фізики: фізика атомів, молекул і твердого тіла : практикум з навч. дисц. "Фізика" / О. О. Бондаренко, О. М. Гоков, К. О. Катрунов та ін. ; за ред. О. О. Бондаренко. – Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. – 248 с.
9. Зайцев А. П. Справочник по техническим средствам защиты информации и контроля технических каналов утечки информации / А. П. Зайцев, А. А. Шелупанов. – Томск : Изд. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2004. – 197 с.
10. Лаптев О. А. Методологічні основи автоматизованого пошуку цифрових засобів негласного отримання інформації / О. А. Лаптев. – Київ : Міленіум, 2020. – 326 с.
11. Меньшаков Ю. К. Основы защиты от технических разведок : учеб. пособ. / Ю. К. Меньшаков. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 339 с.
12. Меньшаков Ю. К. Теоретические основы технических разведок : учеб. пособ. / под ред. Ю. Н. Лаврухина. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 536 с.

13. Пасечник И. П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях / И. П. Пасечник. – Москва : Наука. – 1970. – 132 с.
14. Трофимова Т. И. Краткий курс физики / Т. И. Трофимова. – Москва : Высш. школа, 2001. – 541 с.
15. Электроакустика и звуковое вещание : учеб. пособ. для вузов / И. А. Алдошина, Э. И. Вологдин, А. П. Ефимов и др. ; под ред. Ю. А. Ковалгина. – Москва : Горячая линия – Телеком ; Радио и связь, 2007. – 872 с.
16. Бабурин А. В. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс] : учеб. пособ. / А. В. Бабурин, А. С. Пахомова. (5,34 Мб) – Воронеж : ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет", 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
17. Гоков О. М. Фізика [Електронний ресурс] : навч. посіб. / О. М. Гоков ; Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця. – Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2019. – 292 с. – Режим доступу : <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/21511>.
18. Сайт ПНС ХНЕУ ім. С. Кузнеця. – Режим доступу : <https://pns.hneu.edu.ua/course/view.php?id=4351>.
19. Технические средства и методы защиты информации [Электронный ресурс] : учебник для вузов. – Режим доступа : http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/611/-63611/33810?p_page=3.
20. Электронный учебник физики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://physbook.ru>.

Зміст

Вступ	3
Розділ 1. Фізичні основи технічної розвідки 1	9
1. Технічна розвідка. Основні цілі, принципи та завдання	9
1.1. Основні поняття	9
1.2. Поняття технічних розвідок	10
1.3. Мета та завдання технічної розвідки	12
1.4. Організація технічної розвідки	13
1.5. Класифікація технічних розвідок	14
1.6. Поняття "технічні канали витоку інформації"	18
2. Фізичні основи захисту від фотографічної й оптико-електронної розвідки	23
2.1. Основні поняття оптичної й оптико-електронної розвідки	24
2.2. Основи фотометрії	28
2.3. Хвильова оптика. Інтерференція й дифракція світла	33
2.4. Поширення світла в речовині	52
2.5. Основи фотографічної розвідки	67
2.6. Оптико-електронна розвідка	69
2.7. Основні засоби відеоспостереження та знімання	74
3. Фізичні основи захисту від радіоелектронної розвідки	82
3.1. Основні поняття	83
3.2. Радіо- і радіотехнічна розвідка	85
4. Фізичні основи захисту від радіолокаційної розвідки	97
4.1. Основні поняття	97
4.2. Загоризонтні радіолокаційні станції	106
5. Фізичні основи захисту від акустичної та гідроакустичної розвідки	111
5.1. Фізичні основи захисту від гідроакустичної розвідки	112
5.2. Фізичні основи захисту від акустичної розвідки	125
5.3. Загальні відомості про закладні пристрої та пристрої перехоплення мовної інформації	132
Розділ 2. Фізичні основи технічної розвідки 2	143
6. Фізичні основи захисту від радіаційної розвідки	143
6.1. Основні поняття	143
6.2. Прилади для вимірювання іонізуючих випромінювань ...	147
6.3. Загальна характеристика методів реєстрації іонізуючих випромінювань	151

6.4. Загальні характеристики детекторів іонізуючих випромінювань	152
7. Фізичні основи захисту від хімічної розвідки	157
7.1. Основні поняття	157
7.2. Методи й засоби вимірювань під час хімічної розвідки	160
7.3. Методи хімічного аналізу.....	163
8. Фізичні основи захисту від сейсмічної розвідки	172
8.1. Основні поняття	173
8.2. Сейсмічні хвилі у твердих середовищах.....	175
8.3. Особливості поширення хвиль у пружних середовищах.....	178
8.4. Загасання сейсмічних хвиль	182
8.5. Хвильові поля сейсмічних джерел	182
8.6. Застосування спектрального аналізу для вивчення динамічних характеристик сейсмічних хвиль	185
9. Фізичні основи захисту від магнітометричної розвідки	187
9.1. Основні поняття	188
9.2. Земний магнетизм і його елементи	189
9.3. Методи вимірювань елементів земного магнетизму й апаратура магнітометричної розвідки	191
10. Фізичні основи захисту від комп'ютерної розвідки	198
10.1. Основні поняття	199
10.2. Особливості комп'ютерної розвідки	200
10.3. АСОД та основні способи несанкціонованого доступу	205
10.4. Використання програмних закладок і комп'ютерних вірусів	209
11. Фізичні основи захисту від радіотеплової розвідки	212
11.1. Основні поняття. Фізична сутність теплового випромінювання та його закони.....	213
11.2. Кількісні характеристики радіотеплового випромінювання	223
11.3. Радіотеплове випромінювання природних і штучних об'єктів.....	225
11.4. Характеристики радіотеплових сигналів	229
11.5. Особливості приймання радіотеплових сигналів.....	230
11.6. Радіотеплові сигнали як передавачі інформації	239
11.7. Структурні схеми радіотеплолокаторів	242
Використана та рекомендована література	251

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Гоков Олександр Михайлович

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ РОЗВІДКИ

Навчальний посібник

Самостійне електронне текстове мережеве видання

Відповідальний за видання *Ю. В. Буц*

Відповідальний редактор *О. С. Вяткіна*

Редактор *О. Г. Доценко*

Коректор *О. Г. Доценко*

План 2022 р. Поз. № 23-ЕНП. Обсяг 255 с.

Видавець і виготовлювач – ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 61166, м. Харків, просп. Науки, 9-А

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
ДК № 4853 від 20.02.2015 р.*