

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
Житомирський військовий інститут радіоелектроніки
імені С.П.Корольова

**ОСНОВИ ПОБУДОВИ КОМПЛЕКСІВ
КОСМІЧНОЇ ВИДОВОЇ РОЗВІДКИ**

За редакцією кандидата технічних наук,
доцента О.Є. Горшеніна

Затверджено начальником інституту як навчальний
посібник для курсантів

Житомир
2007

УДК 629.78
ЦББК 651.13-91
0-75

Рекомендовано до друку вченою радою Житомирського військового інституту радіоелектроніки імені С.П. Корольова (протокол №11 від 28 лютого 2006 року).

Рецензенти:

Ю.К. Рєбрін - доктор технічних наук, професор

Д.А. Іщенко - кандидат технічних наук, доцент

0-75 Основи побудови комплексів космічної видової розвідки/
О.Є. Горшенін, С.О. Кондратенко, О.Ф. Дубина, П.П. Топольницький; За ред. О.Є.Горшеніна. – Житомир: ЖВІРЕ, 2007. - 388 с.

Навчальний посібник розроблено з метою підготовки курсантів військового інституту, які навчаються за фахом «Системи та засоби автоматизації управління військами та озброєнням» з відповідною спеціалізацією.

У посібнику розглядаються основні принципи побудови комплексів космічної видової розвідки та їх обладнання, а також принципи та особливості отримання знімків земної поверхні з космічних апаратів у видимому, інфрачервоному та радіодіапазонах хвиль. Навчальний посібник може бути корисним для фахівців та студентів, які працюють та навчаються в галузі аерокосмічного моніторингу та дистанційного зондування Землі.

Автори: кандидат технічних наук, доцент **Горшенін О.Є.**, кандидат технічних наук **Кондратенко С.О.**, кандидат технічних наук **Дубина О.Ф.**, кандидат технічних наук, доцент **Топольницький П.П.**

УДК 629.78

ЦББК 651.13-91

© О.Є. Горшенін, С.О. Кондратенко,
О.Ф. Дубина, П.П. Топольницький, 2007

ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник розроблено відповідно до програми дисципліни “Основи побудови комплексу космічної видової розвідки.” Він призначений для курсантів третього курсу, які навчаються за спеціальністю “Комплекси, системи та засоби автоматизації управління військами та озброєнням” по відповідній спеціалізації.

У посібнику розглядаються основи побудови бортового спеціального комплексу космічного апарата видової розвідки (або дистанційного зондування Землі) та наземного спеціального комплексу прийому та обробки спеціальної інформації. Детально розглядаються принципи отримання знімків земної поверхні у видимому, інфрачервоному та радіодіапазонах хвиль. Розглядаються принципи побудови та характеристики датчиків зображень у відповідних діапазонах. Особлива увага приділяється впливу умов знімання та технічних характеристик датчиків на якість зображень, що отримуються.

Окремо розглядаються принципи побудови комплексу космічної видової розвідки в цілому та загальна організація обробки спеціальної інформації. У цій частині викладено суто теоретичний підхід щодо основних принципів побудови комплексу космічної видової розвідки. Наведені організаційні структури та розподіл завдань між ними не мають відношення до реальної організації космічної розвідки України.

Приділена увага також принципам побудови технічних засобів наземного спеціального комплексу.

ВСТУП

Досвід ведення бойових дій в останніх локальних конфліктах показує, що своєчасне отримання інформації про противника є одним із основних факторів, що впливають на хід ведення операцій в цілому. Одним із основних джерел отримання такої інформації є система видової космічної розвідки.

Сучасні технічні можливості видової космічної розвідки дозволяють забезпечити керівництво країни, органи державного управління, командування видів збройних сил і оперативних напрямків, а також штаби з'єднань найбільш повними даними про стан військових і промислових об'єктів у потрібних районах Землі.

Застосування космічної зйомки об'єктів дає можливість одержати найбільш об'єктивні дані. Космічний знімок являє собою об'єктивне й докладне зображення місцевості, що відповідає моменту зйомки; перевага його полягає в тому, що він зовсім вільний від суб'єктивного враження розвідника.

На космічному знімку можна одержати зображення досить великої ділянки місцевості, залежно від поставленої мети, від десятків до сотень квадратних кілометрів, що дозволяє докладно й точно визначати взаємне положення елементів місцевості, рельєфу й об'єктів супротивника на значній території.

При відповідній структурі орбітального угруповання розвідувальних космічних апаратів проміжок часу від початку зйомки й до моменту одержання розвідувальної інформації вимірюється годинами, тому космічний знімок дає можливість у короткий строк одержати найсвіжіші дані про місцевість і супротивника.

Повторна зйомка однієї й тієї ж місцевості дозволяє стежити за всіма змінами, які відбуваються на об'єктах розвідки.

Перевага космічної зйомки полягає ще й у тому, що вона дає можливість вивчати камеральним шляхом (у штабних умовах) зайняту супротивником місцевість і його розташування на будь-яку глибину. Це значно полегшує командирам і штабам

всіх ступенів уточнення й рішення багатьох питань перед прийняттям рішення й у ході операції.

У цей час космічні засоби видової розвідки успішно комплексуються з авіаційними засобами. Це дозволяє скласти переваги космічної й повітряної розвідки й взаємно компенсувати їхні недоліки. Космічна видова розвідка (КВР) має екстериторіальність (розвідувальний космічний апарат може безперешкодно знімати над будь-якою територією Землі). Літак - розвідник може знімати об'єкт розвідки в потрібний час і з короткими інтервалами часу. На космічному знімку може поміститися місто середньої величини разом із передмістями, а детальність зробленого з малої висоти знімка дозволяє розпізнати дрібні деталі об'єкта (такі як форма повітрязабірників вертольота). Тому комплексне використання космічних і авіаційних засобів видової розвідки дозволяє одержати найбільш повну й достовірну розвідувальну інформацію.

Зазначені властивості аерокосмічних знімків - об'єктивність, точність і повнота даних - дозволяють офіцерові й штабу будь-якого роду військ широко використовувати їх для рішення численних завдань. Основні із цих завдань такі:

- забезпечення органів військового планування даними про дії маневрених сил супротивника, маршрути їхнього руху й проведені заходи;

- виявлення й визначення координат ракетних пускових установок та інших важливих військових об'єктів, підготовка даних для засобів активного ураження;

 - контроль результатів нанесення ударів по супротивнику;

- виявлення фактів використання маскувальних засобів на територіях, що розвідуються;

 - перевірка якості маскуванню своїх військ;

- виявлення наземних (підземних, підводних) об'єктів штучного походження й оцінка їхньої воєнної значимості;

- вивчення стану об'єктів економічного потенціалу супротивника;

 - виправлення й доповнення топографічних карт території

супротивника й своєї території, складання нових топографічних карт;

вивчення й оцінка місцевості;

складання бойових графічних документів.

Таким чином, галузь використання результатів видової аерокосмічної розвідки військами досить велика.

Ефективність виявлення й розпізнавання об'єктів залежать від характеристик технічних засобів розвідки й умов зйомки, які, у свою чергу, визначають якість одержуваних зображень.

До технічних засобів видової космічної розвідки відносять: оптико-електронні видимого й інфрачервоного діапазону, фотографічні, радіотеплові, радіолокаційні (радіолокаційні станції бокового огляду), і лазерні (лазерні локаційні станції) бортові засоби розвідки, а також наземні засоби прийому й обробки знімків. Найбільш широке поширення одержали фотографічні, оптико-електронні й радіолокаційні (радіолокаційні станції бічного огляду із синтезованою апертурою) бортові засоби космічного й повітряного базування.

Залежно від задач, які ставляться перед системою аерокосмічної розвідки, знімання може проводитися як у різних спектральних діапазонах, так і різними типами приймачів. Фотознімання забезпечує найкращу роздільну здатність знімків, оптико-електронне знімання дозволяє отримувати і передавати інформацію про об'єкти в масштабі часу, наближеного до реального. Отримання знімків земної поверхні за допомогою радіолокаційних станцій бокового огляду надає можливість виявляти замасковані об'єкти. Крім того, для якісної обробки отриманих знімків з метою вилучення інформації з високою достовірністю необхідно враховувати параметри і характеристики ланок системи формування зображення, а саме: земної поверхні, атмосфери, оптичної системи, приймача випромінювання, процесу обробки тощо.

Весь процес обробки отриманих аерокосмічних знімків умовно поділяється на певні етапи. Основні етапи обробки здійснюються на засобах центрів прийому і обробки спеціальної інформації (ЦПОСІ) та регіональних пунктах прийому і обробки

спеціальної інформації (РППОСІ). Вони здійснюють прийом інформації з борту КА, її декодування, первинну, тематичну обробку зображень, архівацію, тиражування та розсилку отриманої інформації споживачам. ЦПОСІ та РППОСІ обладнуються спеціальними радіотехнічними та обчислювальними засобами. Основне обладнання для обробки зображень - автоматизовані робочі місця (АРМ) на базі потужних обчислювальних засобів та копіювальної апаратури. Для обробки фото- та радіолокаційних знімків, що отримуються з літаків, створюються пересувні та стаціонарні пункти прийому та обробки знімків з відповідною апаратурою фотохімічної обробки.

У навчальному посібнику розглянуті принципи побудови, функціонування й основні характеристики бортових і наземних засобів фотографічної, оптико-електронної й радіолокаційної розвідки. Багато уваги приділено впливу на отриманий знімок умов зйомки й характеристик апаратури, що знімає. Розглянуто основні принципи організації взаємодії елементів комплексу видової космічної розвідки в процесі планування розвідки, одержання знімків потрібних районів і їхньої обробки з метою здобування корисної інформації.

Перший розділ посібника присвячений побудові комплексу видової космічної розвідки в цілому, загальним принципам організації процесу знімання та загальним принципам побудови космічних апаратів видової розвідки. Розділ написаний кандидатом технічних наук доцентом Горшеніним О.Є. (підрозділи 1.1, 1.2) сумісно з кандидатом технічних наук доцентом Топольницьким П.П. (підрозділ 1.3).

У другому розділі розглядаються основні принципи побудови датчиків зображень земної поверхні в радіодіапазоні. Розглянуті радіолокатори бічного огляду з синтезованою апертурою (РЛБОСА) та мікрохвильові радіометри. Розділ написаний кандидатом технічних наук, доцентом Горшеніним О.Є.

Третій розділ містить детальне описання принципів отримання зображень та принципів побудови датчиків зображень видимого та інфрачервоного діапазонів. Детально розглянуті фо-

тографічні і оптико-електронні системи знімання разом з фізичними основами отримання зображень у видимому та інфрачервоному діапазонах хвиль. Розділ написаний сумісно кандидатом технічних наук доцентом Горшеніним О.Є. (підрозділи 3.3, 3.4), кандидатом технічних наук Кондратенком С.О. (підрозділи 3.7 – 3.13), кандидатом технічних наук Дубиною О.Ф. (підрозділи 3.1, 3.2, 3.5, 3.6).

Четвертий розділ присвячений просторово - частотному аналізу оптико-електронних та фотографічних датчиків і систем. Розділ написаний сумісно кандидатом технічних наук, доцентом Горшеніним О.Є. (підрозділи 4.1 – 4.3), кандидатом технічних наук Дубиною О.Ф. (підрозділи 4.4 – 4.6).

У п'ятому розділі розглядаються основи побудови наземного обладнання прийому та обробки інформації космічної видової розвідки. Підрозділи 5.1, 5.2 написані кандидатом технічних наук, доцентом Горшеніним О.Є., підрозділи 5.3, 5.4 написані кандидатом технічних наук Кондратенком С.О.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВИ ПОБУДОВИ КОМПЛЕКСУ КОСМІЧНОЇ ВИДОВОЇ РОЗВІДКИ

1.1. Загальні принципи побудови комплексу космічної видової розвідки

Космічна розвідка - це обширна і багатогранна область розвідки, яка здобуває інформацію про противника за допомогою спеціальних засобів, розташованих на космічних апаратах (КА) або космічних кораблях (КК). Вона є найважливішою частиною державної та військової розвідки.

За допомогою сил і засобів космічної розвідки (КР) розвідувальні органи держави здатні здобувати інформацію про внутрішньополітичне положення, стан економіки і обороноздатності країн, що цікавлять.

Поряд з цим, космічна розвідка є одним із засобів забезпечення бойової діяльності військ і спрямована на своєчасне викриття замислів противника, встановлення дислокації й чисельності та стану його військ. Вона безперервно здійснюється не тільки в воєнний, але й у мирний час.

Споживачами інформації космічної розвідки можуть бути:

- Генеральний штаб Збройних Сил України;
- види Збройних Сил України, окремі роди військ та оперативні командування;
- органи військової розвідки;
- Департамент охорони державного кордону;
- служба зовнішньої розвідки;
- міністерства, окремі відомства, організації країни.

Характер здобутої інформації тісно пов'язаний з цільовим призначенням розвідінформації і вимогами споживача. Це може бути:

- інформація виявлення та місцевизначення конкретних локальних об'єктів;
- інформація про стан і режими роботи об'єктів;
- інформація про кількісні характеристики об'єктів тощо.

Сучасна космічна техніка має унікальні можливості щодо оперативного і глобального спостереження поверхні Землі, її атмосфери, навколоземного космічного простору. Сучасні фотографічні, оптико-електронні і радіотехнічні бортові засоби космічних апаратів дозволяють у кожній ланці спектра випромінювань зібрати і передати наземним приймальним пунктам величезні масиви інформації про наземні об'єкти.

Космічна розвідка має істотні переваги перед наземною, морською та повітряною розвідками:

- відсутність державних кордонів для космічної розвідки;
- в космосі існують сприятливі умови для ведення розвідки як у інфрачервоному, так і в видимому діапазоні спектра;
- космічна розвідка у змозі розвідувати цілі, що знаходяться у глибині будь-якої країни і недосяжні для інших видів розвідки;
- космічна розвідка досить надійна, тому що розвідувальні космічні апарати малоуразливі.

1.1.1. Класифікація видів космічної розвідки

За принципами і засобами космічна розвідка класифікується за такими видами: радіоелектронна розвідка (радіорозвідка, радіотехнічна розвідка) та видова розвідка (рис.1.1).

Радіорозвідка ведеться за сигналами радіозв'язку противника (телефонного, телеграфного, радіорелейного тощо.). Її основне завдання - здобувати відомості про противника шляхом виявлення, перехоплення відкритих і кодованих передач радіостанцій, пеленгування джерел радіосигналів і визначення їх місцезнаходження, обробки і аналізу перехопленої інформації з метою розкриття її змісту [1].

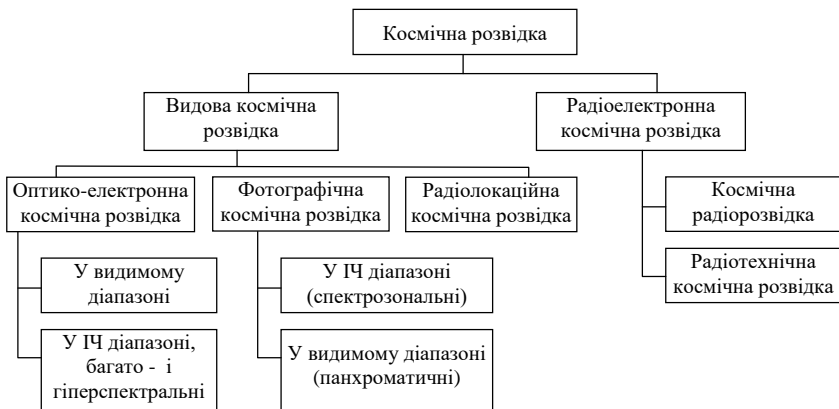


Рис.1.1. Види космічної розвідки

Радіотехнічна розвідка призначена для виявлення та розпізнання сигналів радіолокаційних станцій (РЛС), радіонавігаційних, телеметричних і телекомандних систем. Вона дозволяє здобувати відомості про розміщення і типи РЛС, зони їх дії та призначення [1].

Видова розвідка, в свою чергу, поділяється на фоторозвідку, оптико-електронну розвідку та радіолокаційну розвідку [1].

Фоторозвідка призначена для отримання інформації про противника шляхом фотографічного знімання ланок земної поверхні. Вона має найвищу роздільну здатність, тобто знімки ланок земної поверхні найбільш детальні та інформативні. Власний її недолік - низька оперативність отримання інформації з фотознімків. Це пов'язано з необхідністю фотохімічної обробки фотоматеріалів після знімання. До того ж фотоплівка – матеріал, який витрачається без поновлення на борту КА. У зв'язку з цим ресурс КА фоторозвідки обмежений і зараз перевага надається іншим засобам космічної видової розвідки.

Оптико-електронна розвідка призначена для отримання відомостей про противника за допомогою оптико-електронної (ОЕ) апаратури на видимій та інфрачервоній смузі спектра випромінювань. Зображення земної поверхні, які отримані ОЕ апаратурою в видимій ланці спектра випромінювань, за своїми

якісними показниками наближаються до фотографічних, але поки що мають дещо меншу детальність (роздільну здатність).

ОЕ розвідка в інфрачервоній (ІЧ) ділянці спектра здобуває відомості про об'єкти по їх інфрачервоному випромінюванню. При цьому на отриманих ІЧ знімках місцевості фіксується як власне ІЧ випромінювання об'єктів (у нічний час), так і відбите сонячне ІЧ-випромінювання (вдень). Різновидом ІЧ ОЕ розвідки є радіотеплова розвідка, яка здобуває відомості по радіотепловому випромінюванню.

Знімки місцевості, які отримані сучасними ОЕ засобами, зберігаються на борту КА у вигляді цифрових масивів у бортовому запам'ятовуючому пристрої.

Порівняно з фоторозвідкою ОЕ розвідка значно оперативніша і дозволяє постійне відновлення ресурсу (вивільнення запам'ятовуючого пристрою).

Радіолокаційна розвідка призначена для здобуття інформації про противника за допомогою спеціальних радіолокаційних станцій бокового огляду (РЛСБО). РЛСБО дозволяє незалежно від метеорологічних умов і часу доби отримувати радіолокаційні знімки обраних ланок земної поверхні.

Отримані ОЕ і радіолокаційними засобами зображення земної поверхні зберігаються в бортовому запам'ятовуючому пристрої КА і під час сеансів зв'язку з КА по спеціальних радіоканалах зв'язку передаються на Землю.

У подальшому при розгляданні КА будемо розуміти космічний апарат саме видової космічної розвідки.

1.1.2. Задачі, структура та загальні характеристики комплексу космічної видової розвідки

Комплекс космічної видової розвідки (ККВР) призначений для оперативного збору, обробки і доведення до вищого військово-політичного керівництва держави розвідінформації стратегічного і оперативно-тактичного характеру. Крім того, засоби комплексу космічної видової розвідки можуть бути

використані в інтересах виконання народногосподарських задач дистанційного зондування в рамках екологічного моніторингу, земле- та лісовикористання, дослідження природних ресурсів.

Виходячи з призначення, можна виділити такі задачі ККВР:

- щоденний контроль системи базування і пунктів постійного розташування сил загального призначення;

- планово-періодичне спостереження стаціонарних військових об'єктів і об'єктів військово-промислового комплексу;

- планово-періодичне спостереження оперативної обстановки можливих театрів ведення бойових дій або районів локальних конфліктів і кризових становищ;

- контроль системи базування військово-морських сил, стратегічної, розвідувальної та військово-транспортної авіації, формувань подвійного базування та аеромобільних військ швидкого реагування;

- планово-періодична розвідка морських (океанічних) акваторій;

- дистанційне зондування земної поверхні в інтересах господарства (отримання зображень земної поверхні для вирішення задач екологічного моніторингу, земле- і лісовикористання);

- прийом і реєстрація розвідінформації, що надходить з борту космічних КА;

- обробка інформації, що отримана від бортових засобів з метою вилучення конкретної інформації в інтересах споживачів з заданою якістю;

- збір, реєстрація, тиражування і оперативне доведення до споживачів отриманої інформації.

До складу ККВР входять три основні частини (рис. 1.2):

- орбітальне угруповання розвідувальних КА і КА - ретрансляторів;

- наземний та інформаційний комплекс прийому і обробки розвідінформації (НІК);

- наземний автоматизований комплекс управління орбітальним угрупованням (НАКУ).

До складу орбітального угруповання можуть входити декілька КА, обладнаних спеціальною апаратурою оптико-електронної розвідки і РЛСБО (для радіолокаційної розвідки). Ці КА виводяться потужними ракетами-носіями з наземних космодромів або морських платформ на орбіти, які є близькими до кругових (з нахилом 96...98 град.) і висотою 200 – 900 км, що забезпечує послідовний огляд поверхні Землі зі смугою огляду 40-400 км при роздільній здатності одиниці - десятки метрів (оглядова розвідка) або зі смугою огляду біля 10 км при роздільній здатності менше одного метра (детальна розвідка).

Для забезпечення оперативності отримання зображень поверхні Землі в межах декількох (6...8) годин необхідно мати в угрупованні 5...6 КА, розташованих на однаковій висоті, рівномірно розподілених навколо Землі. Від синхронного руху супутників у такій системі залежить ефективність роботи всього комплексу.

Під час кризових ситуацій або при необхідності проведення детальної розвідки об'єктів з високим розділенням в орбітальне угруповання можуть вводиться легкі КА оптико-електронної або фоторозвідки (мікросупутники), які можуть виводитися на еліптичні орбіти з перигеєм порядку 110...160 км над потрібним районом. Декілька таких КА можуть бути виведені на орбіту однією потужною ракетою-носієм з поверхні Землі або один - методом повітряного старту з літака-носія, що різко підвищує оперативність створення угруповання. Але низькоорбітальні КА мають малий час існування (приблизно 30...70 діб).

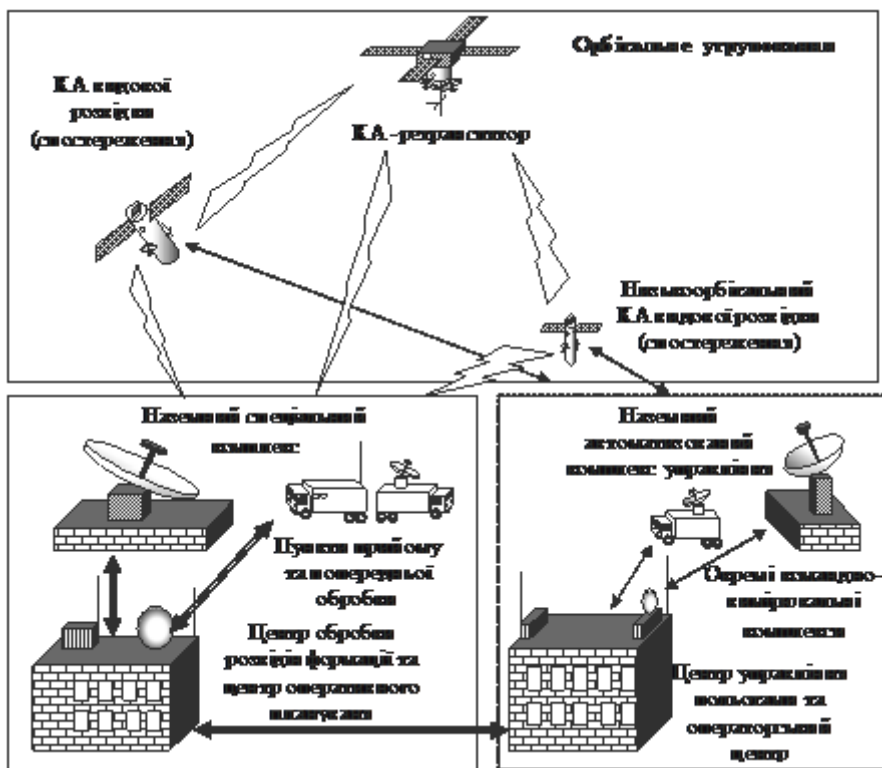


Рис. 1.2. Структура комплексу космічної видової розвідки

Активна електромеханічна система орієнтування та стабілізації забезпечує рівномірність смуги огляду, а також орієнтацію повздовжньої осі корпусу КА з установленими на ньому датчиками бортового інформаційного вимірювального комплексу на центр Землі, а його поперечної осі - в напрямку польоту.

Енергоживлення КА здійснюється завдяки сонячним батареям, які автономно орієнтуються на Сонце за допомогою спеціального приводу згідно з сигналами датчика напрямку на Сонце. Коли КА знаходиться у затінку, для живлення апаратури та зняття піків навантаження застосовуються хімічні батареї. Ре-

гулювання процесів заряду-розряду, управління та розподілення живлення здійснюють блоки автоматики і комутації.

Система терморегулювання підтримує необхідний тепловий режим апаратури КА.

Управління, контроль стану і вимірювання траєкторії КА ведуться засобами наземного автоматизованого комплексу управління (НКУ), який має необхідні радіотехнічні і обчислювальні засоби для обробки і аналізу телеметричної інформації (ТМІ), а також для реалізації командного управління.

До складу НКУ входять стаціонарні окремі командно-вимірювальні комплекси (ОКВК) і центр управління польотом (ЦУП). Ведеться розробка пересувних командно-вимірювальних комплексів на автомобільних шасі.

ОКВК у складі НКУ вирішує такі задачі:

передачу на КА командно-програмної інформації, а також прийом квитанцій про її проходження;

вимір параметрів руху КА;

звірення бортового і наземного часу;

прийом, виділення, оперативну обробку і реєстрацію телеметричної інформації;

прийом єдиних цифрових потоків, сформованих у ЦУП, і передачу їх на КА;

прийом єдиних цифрових потоків з КА і передача їх у ЦУП.

Для забезпечення інформаційного обміну ОКВК-ЦУП і ЦУП-споживачі до складу НКУ входять елементи систем передачі даних (СПД), що працюють по кабельних орендованих лініях зв'язку і по радіорелейних лініях. Основну задачу ККВР за цільовим призначенням безпосередньо виконує наземний спеціальний комплекс (НК). Він здійснює такі операції:

приймає від КА по ширококутній радіолінії зв'язку (ШРЗ) закодовані дані, які несуть інформацію зображень визначених районів;

декодує отримані дані з метою отримання зображень;

здійснює обробку зображень з метою поліпшення їх якості та усунення викривлень;

здійснює координатну прив'язку зображень до цифрових карт місцевості;

здійснює тематичну обробку зображень в інтересах споживачів;

складає паспорти та описи зображень;

архівує, тиражує та розподіляє між споживачами отриману розвідінформацію.

До складу НК входять стаціонарні та пересувні пункти прийому інформації (ППІ) і центр обробки розвідувальної інформації (ЦОРІ). ППІ здійснює прийом інформації з борту КА, її декодування та первинну обробку зображень. ППІ обладнується спеціальними радіотехнічними та обчислювальними засобами. ЦОРІ здійснює тематичну обробку зображень, архівацію, тиражування та розсилку отриманої інформації споживачам. Основне обладнання ЦОРІ - автоматизовані робочі місця (АРМ) на базі потужних обчислювальних засобів та копіювальної апаратури. Взаємодія ППІ, ЦОРІ, НАКУ і споживачів здійснюється за допомогою СПД.

1.2. Загальні принципи побудови космічних апаратів розвідувального призначення

Космічна розвідка по своїй значимості займає провідне місце, будучи важливою складовою частиною стратегічної і оперативної розвідки держав. Основою космічної розвідки є КА з розміщеними на них технічними засобами спостереження і передачі інформації, що добувається. Космічний апарат, призначений для космічної розвідки, у загальному випадку складається з бортового забезпечуючого комплексу (БЗК) і бортового спеціального комплексу (БСК).

1.2.1. Загальні принципи побудови забезпечуючої частини КА розвідувального призначення

БЗК має такий склад:
корпус (конструкція);
двигуни коректування траєкторії, маневру тощо;
видаткові матеріали (паливо, стиснуті гази тощо);
система електропостачання;
система терморегулювання;
система стабілізації й орієнтації;
БЦОМ чи програмний пристрій;
система керування (система наведення);
система навігації і радіоконтролю орбіти;
радіоелектронне устаткування (командна радіолінія, телеметрична система);

На рис.1.3 для зручності структурна схема БЗК розбита на функціональні частини.

Стабілізація й орієнтація. Для забезпечення заданої смуги огляду й одержання необхідного розрізнення на місцевості повздовжня вісь корпусу КА з установленими на ньому датчиками БСК повинна орієнтуватися на центр Землі, а його поперечна вісь - за напрямком польоту з точністю 1+2 кутових хвилин. Коливання корпусу всередині цих кутових меж не повинні мати швидкість більше 0,001 градуса в секунду. Реалізувати ці вимоги вдається за допомогою активної електро-механічної системи орієнтації і стабілізації (рис. 1.4).

Система електропостачання. Енергоживлення КА здійснюється за рахунок сонячних батарей, які автономно орієнтуються на Сонце спеціальним приводом за сигналами датчика напрямку на Сонце. Для живлення апаратури, коли КА знаходиться в тіні, і для зняття навантаження використовуються хімічні батареї.

Регулювання процесів "заряду-розряду", керування і розподіл живлення роблять блоки автоматики і комутації.

Система терморегулювання підтримує необхідний тепловий режим апаратури КА, керуючи процесами поглинання і

відбиття поверхнею тепла, що приходить від Землі і Сонця, а також випромінюванням тепла, що виділяється апаратурою КА при її роботі. Важливу роль у вирівнюванні внутрішньої температури грають вентилятори, що забезпечують рух охолоджувального газу усередині герметичного корпусу КА при відсутності конвекції в невагомості.

Система керування. Керування режимами збору і передачі інформації, переключення основних і резервних комплектів апаратури й інших комутаційних операцій здійснюється командною радіолінією і програмно-часовим пристроєм, що запам'ятовує і реалізує програми зв'язку з наземними приймальними пунктами і програми вибору районів розвідки.

Система телеметрії. Для контролю стану апаратури використовується радіотелеметрична система, що працює в режимах запису-відтворення і безпосередньої передачі. Вона забезпечує автоматичний чи напівавтоматичний контроль за роботою окремих блоків. Важливою функцією є видача необхідних сигналів при відмові окремих елементів.

Система радіоконтролю орбіти. Для визначення траєкторії руху КА, що лежить в основі формування цілевказівок для антен наземних приймальних пунктів, використовується система радіоконтролю орбіти з високостабільним передавачем. Вимір елементів орбіти здійснюється на основі ефекту Доплера.

Система автономної навігації. Це найсучасніший засіб забезпечення просторової прив'язки та орієнтації КА. В основу системи автономної навігації можуть бути покладені звичайні сучасні навігаційні системи космічного базування, такі як американська NAVSTAR (GPS) або російська ГЛОНАС. Для забезпечення більшої автономності в майбутньому можуть бути використані автономні навігаційні системи на базі кореляційно - екс-

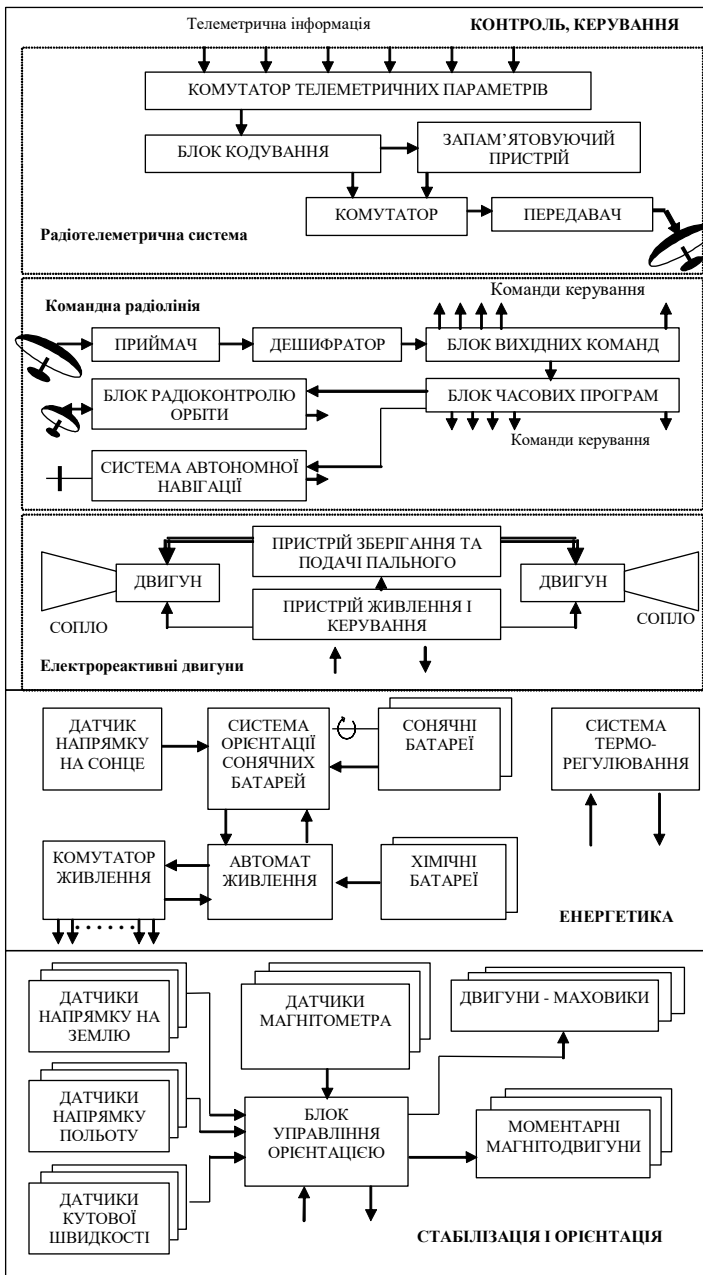


Рис.1.3. БЗК КА розвідувального призначення

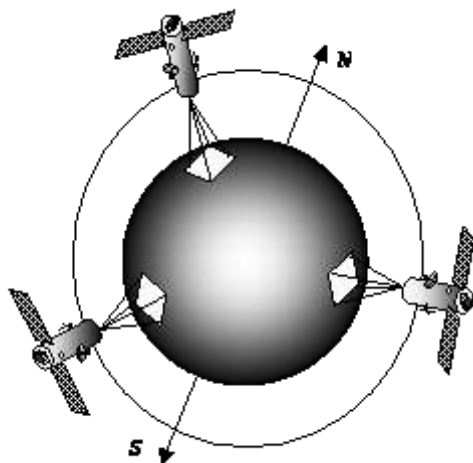


Рис. 1.4. Робота системи орієнтації і стабілізації

тремальних методів навігації за фізичними полями Землі (магнітному або гравітаційному полю, полях випромінювань об'єктів на земній поверхні та інших).

Керування, контроль стану і вимір траєкторії КА ведуться також засобами наземного КВК, що має необхідні радіотехнічні, оптико-електронні й обчислювальні засоби для обробки й аналізу ТМІ і для реалізації командного керування.

КА видової розвідки повинні у визначений час спостерігати потрібні райони Землі без накладок і повторень, у суворій послідовності передавати отриману інформацію приймальним пунктам.

Однак із ряду причин домогтися такої синхронної роботи без застосування спеціальних засобів поки не вдається. Вивід КА на орбіту здійснюється з похибками. Такі постійно і періодично діючі сили, як опір атмосфери, притягання Сонцем і Місяцем, світловий тиск також приводять до збурювання орбіт КА. Тому на КА приходиться встановлювати коригувальні двигуни. З цією метою застосовуються відносно неважкі електрореактивні двигуни, що створюють тягу за рахунок розгону потоку заряджених часток за допомогою електричного поля.

Існуючі засоби виведення КА на орбіту (ракетносії) накладають на вагу КА серйозні обмеження. Наприклад, системи живлення з сонячними батареями і хімічними батареями складають 20% від загальної його ваги. Тому споживна потужність апаратури повинна бути мінімальною. Вагові обмеження вступають у протиріччя з вимогами максимальної надійності і терміну служби (не менше 2-3 років), тому що для цього звичайно звертаються до резервування приладів.

Наявність різноманітної інформаційної апаратури і декількох радіоліній з антенними пристроями в різних діапазонах вступають у протиріччя з конструктивними можливостями розміщення датчиків інформації й орієнтації, а також антен, яким не повинні заважати ніякі елементи конструкції КА. Важко забезпечити електромагнітну сумісність систем, зменшити до мінімуму їхній взаємний вплив.

1.2.2. Типова структура бортового спеціального комплексу КА видової розвідки

Залежно від використовуваного спектрального діапазону ті чи інші елементи апаратури можуть мінятися. До того ж для виконання завдань видової розвідки в наш час широко застосовуються КА ДЗЗ (спостереження). Тому типовий БСК спостереження при спільній обробці інформації відразу в декількох діапазонах спектра, тобто при проведенні синхронних комплексних зйомок, має вигляд, показаний на рис.1.5.

У БСК входять:

кілька датчиків інформації (знімальних камер), що працюють одночасно;

загальний пристрій кодування й ущільнення, що поєднує окремі види інформації в єдиний інформаційний потік;

запам'ятовуючі пристрої, у які надходить інформація; спеціальна ширококутова радіолінія зв'язку (ШРЗ).



Рис.1.5. Бортовий спеціальний комплекс КА спостереження

Комплексування різних датчиків на одному КА застосовується частіше на КА дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Сумісна обробка знімків одного району, які отримані одночасно в різних діапазонах хвиль, дозволяє вилучити багато корисної інформації для сільського і лісного господарства, геології, воді і землекористування, метеорології. Для КА ДЗЗ суміщення знімків одного району з різних датчиків не є складним, тому що розрізненна здатність датчиків зображень, які застосовують на КА ДЗЗ, не є високою і складає десятки – сотні метрів або навіть десятки кілометрів. Ширина смуг огляду датчиків КА ДЗЗ складає сотні кілометрів, що забезпечує значне перекривання знімків між собою.

Слід відмітити, що комплексування радіолокаційних та оптико-електронних датчиків на одному розвідувальному КА не є доцільним з ряду причин технологічного характеру та з урахуванням особливостей застосування оптико-електронних та радіолокаційних засобів. Особливості застосування оптико-електронних засобів полягають, в першу чергу, в необхідності

сонячного освітлення району розвідки. Відповідно обирається і орбіта КА. Радіолокаційна розвідка не потребує сонячного освітлення, що впливає на вибір орбіти.

Друга причина полягає в істотних розбіжностях в формуванні смуги розвідки та смуги огляду для різних датчиків.

Смуга розвідки оптико-електронного датчика КА КВР визначається висотою польоту КА $H_{КА}$, параметрами датчика та максимально можливим кутом відхилення оптичної осі об'єктива від нормалі α_{max} (рис. 1.6). Кут відхилення оптичної осі об'єктива від нормалі α_{max} зазвичай не перебільшує значення $\pm 30^\circ$, оскільки при перебільшенні цих меж, по перше, атмосфера дуже погіршує властивості зображення, яке формується на оптичному приймачеві, по-друге, на зображенні виникають значні геометричні і перспективні викривлення.

Смуга огляду (смуга захвату) вужча за смугу розвідки, вона визначається кутом зору оптико-електронного датчика. Смуга огляду може бути розташована в будь-якому місці смуги розвідки за рахунок нахилу оптичної осі об'єктива датчика поперек напрямку польоту. У КА розвідки, у яких об'єктиви оптико-електронних датчиків мають великі розміри, нахил здійснюється шляхом відповідного повороту корпусу КА.

Смуга розвідки радіолокаційного датчика КА КВР дорівнює двом смугам огляду за винятком підсупутникової смуги безпосередньо під КА. Ширина підсупутникової смуги визначається висотою польоту КА $H_{КА}$ та кутом α_{min} , у межах якого розділення поперек смуги недостатньо. Для більшості випадків цей кут береться $\pm 40^\circ$ (рис.1.7). Ширина смуги розвідки радіолокаційного КА КВР визначається висотою польоту КА $H_{КА}$ та максимальною похилою дальністю радіолокатора R_{max} .

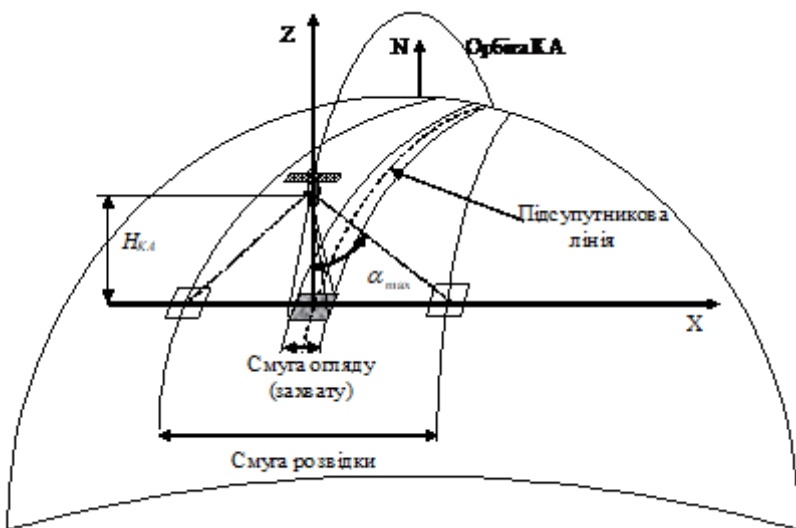


Рис.1.6. Визначення смуги огляду та смуги розвідки КА з оптико-електронними датчиками

У режимі безпосередньої передачі всі датчики працюють разом з передавачем ШРЗ і інформація, отримана ними про підсупутниковий район, відразу ж направляється у НСК. Сигнали цього передавача приймаються на приймально-реєструючих станціях, де після відповідної обробки вони перетворюються в відповідні знімки.

У режимі запам'ятовування інформації датчики направляють отриману інформацію в блоки пам'яті. При вході КА в зону радіовидимості регіональних пунктів прийому інформації на Землю передається відтворена з пам'яті інформація, що була отримана при огляді. Одержувана ППІ інформація передається в темпі прийому по наземних лініях зв'язку центрам обробки розвідувальної інформації. Одна частина отриманих ними даних після декодування і селекції реєструється у вигляді знімків у різних спектральних діапазонах, з другої – після відповідної обробки та дешифрування створюються вихідні звітно-інформаційні документи.

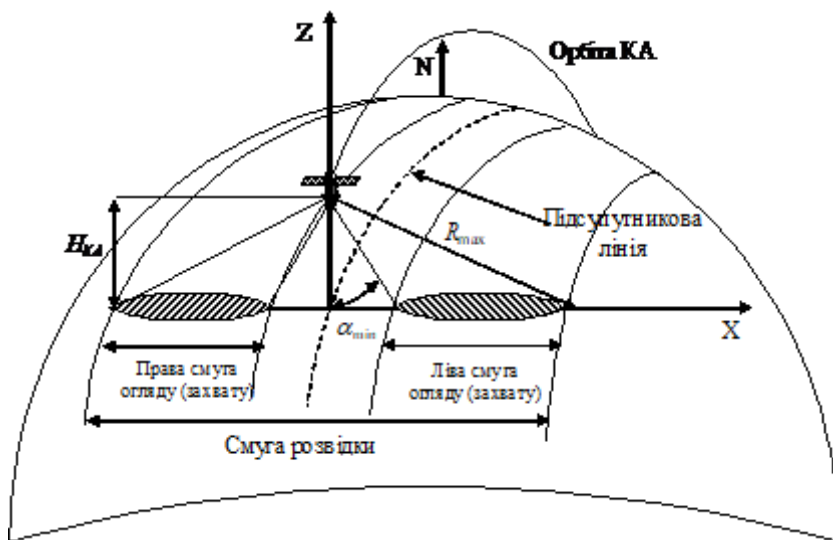


Рис.1.7. Визначення смуги огляду(захвату) та смуги розвідки КА з РЛСБО

При обробці прийнятої та зареєстрованої інформації здійснюється усунення геометричних та радіометричних викривлень, географічна та часова прив'язка інформації до районів знімання. Зображення, які отримані від точних оптико-електронних пристроїв з каліброваними сигналами, фотометруються, тобто уточнюються інтенсивність випромінювання для кожного елемента поля огляду апаратури і кожного піддіапазону спектра. Ці дані перетворюються в стандартну форму і запам'ятовуються на носіях в ЕОМ. Масиви інформації, що пройшли первинну обробку, видаються фахівцям різних напрямків для цільової чи вторинної обробки.

При одержанні радіоголографічних зображень у радіодіапазоні використовується двоетапний метод одержання радіолокаційного зображення об'єктів. За таким принципом працюють РЛС БО зі штучним (синтезованим) розкритом антени.

Перший етап складається з одержання радіоголограми. Передавальна антена опромінює місцевість, що знаходиться збоку. Передавач за допомогою передавальної антени опромінює одночасно всю задану зону огляду в глибину. Відбита від об'єкта хвиля досягає прийомної антени, де за допомогою елементів

прийомної системи визначаються амплітуди і фази хвильового фронту в кожній точці прийому. Система пам'яті забезпечує реєстрацію цих даних, які утворюють радіоголограму.

Одновимірні радіоголограми від кожного елемента місцевості, що розділяються за дальністю, записуються в запам'ятовуючому пристрої послідовно по траєкторії польоту КА. Чим більше час запису і швидкість польоту, тим більше розмір синтезованої апертури (голограми) і тим вище розділення за азимутом. Розділення за дальністю визначається тривалістю імпульсу передавача.

На другому етапі по радіоголограмі за допомогою оптичного обчислювального пристрою чи ЕОМ відновлюється хвильовий фронт і формується вихідне зображення об'єкта.

1.3. Організація взаємодії між елементами ККВР при управлінні КА

Управління, контроль стану і вимірювання траєкторії КА ведуться засобами наземного автоматизованого комплексу управління (НКУ), який має необхідні радіотехнічні і обчислювальні засоби для обробки і аналізу телеметричної інформації (ТМІ), а також для реалізації командного управління.

1.3.1. Організація управління космічними апаратами

Під управлінням КА розуміється процес цілеспрямованої зміни його стану для якісного виконання ним завдань за цільовим призначенням [2].

Стан КА характеризується:

- параметрами його руху;
- поточними значеннями показників працездатності;
- якістю вирішення завдань бортовим спеціальним комплексом.

Метою управління є досягнення необхідних інтегральних або локальних значень вихідного ефекту, обумовленого призначенням КА [2].

Залежно від місця формування керуючих впливів розрізняють три способи управління КА:

командний спосіб, при якому управління здійснюється за командами, що були передані з НКУ;

програмний спосіб, при якому управління здійснюється за допомогою програм, записаних у бортовий програмно-часовий пристрій (БПЧП);

командно-програмний спосіб, при якому управління здійснюється як за командами із НКУ, так і за програмами БПЧП.

Найбільш часто при управлінні КА реалізується командно-програмний спосіб управління.

Для його реалізації використовуються такі керуючі впливи: разові команди (РК), передані із Землі по радіолініях, що підлягають негайному виконанню бортовою апаратурою;

команди програмно-часових пристроїв (ПЧП) і бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ);

сигнали бортової автоматики;

команди з пульта космонавта.

РК можуть бути функціональними й числовими.

Функціональні команди реалізують на борту в темпі їхнього прийому окремі елементарні операції: включення (вимикання) приладів або систем, завдання певного режиму їхньої роботи, перемикання комплектів приладів, введення (зняття) блокування на виконання деяких функцій тощо.

Числові команди (на практиці часто використовують жаргонний термін «вставки») несуть інформацію про деяку фізичну величину: кути розвороту датчика або КА, збільшення швидкості, часові затримки тощо.

Передача РК (функціональних і числових) здійснюється по радіолінії у режимах із квітуванням і без нього. «Квітанції» - це відповідь із борта про прийом певної команди. Режим квітування використовується у всіх випадках, коли необхідно достовірно знати про проходження команди на борт.

Команди ПЧП (БЦОМ) видаються у певній жорсткій часовій послідовності або відповідно переданій по радіолінії часовій програмі. Слова часової програми – це по суті набір разових команд, доповнених кодом необхідного бортового часу їхньої видачі. Часова програма управління складається на певний інтервал часу, що не повинен перевищувати тривалості бортової доби КА.

Управління за сигналами бортової автоматики реалізується для простих стандартних операцій (наприклад, включення бортових систем перед сеансом зв'язку) або при досягненні певним параметром заданої величини (наприклад, вимикання двигуна при досягненні заданого збільшення лінійної швидкості). Для забезпечення високої надійності в управлінні окремі операції можуть виконуватися за командами, що були передані по радіолінії, і дублюватися командами ПЧП (БЦОМ) або сигналами бортової автоматики [3].

Для пілотованих КА функціональні й числові команди можуть також видаватися космонавтами з пульта управління.

Для реалізації процесу управління КА створюється автоматизована система управління (АСУ), під якою розуміється сукупність наземних і бортових засобів з необхідним програмно-алгоритмічним забезпеченням, призначених для забезпечення виконання програми польоту КА. Основними компонентами АСУ КА є бортовий комплекс управління і НКУ.

НКУ КА призначений для управління КА після виведення його на орбіту протягом усього терміну активного існування КА [2].

Як уже відмічалось, НКУ складається із трьох основних елементів:

- системи командно-вимірювальних комплексів;
- системи зв'язку й передачі даних;
- центру управління польотами.

Система командно-вимірювальних комплексів складається з окремих командно-вимірювальних комплексів (ОКВК), оснащених радіотехнічними, оптико-електронними й електронно-

обчислювальними засобами і призначена для передачі на борт КА керуючих впливів і прийому всіх видів інформації з КА.

Система зв'язку й передачі даних призначена для забезпечення процесу управління КА всіма видами зв'язку.

Центр управління польотами (ЦУП) проводить планування й організацію робіт з управління КА, а також обробку всіх видів інформації, циркулюючої в НКУ.

До складу ЦУП входять такі підрозділи [2]:

група планування, призначена для формування й доведення до ОКВК командно-програмної інформації;

група балістичного забезпечення, призначена для обробки вимірів координат, уточнення й прогнозування параметрів руху (орбіти) КА, а також для вирішення завдань вторинної балістики (розрахунок освітленості КА, трас, зон радіотехнічної видимості, цілевказівок наземним засобам тощо.);

група аналізу, призначена для обробки телеметричної інформації й оцінки на її основі технічного стану бортових систем КА;

група управління (ГУ), призначена для контролю виконання запланованої програми робіт і управління КА при виникненні позаштатних ситуацій.

Апаратура БКУ входить до складу БЗК та призначена для прийому, виділення і видачі на системи КА керуючих впливів.

У процесі управління КА в системі «борт-земля» циркулюють такі види інформації [2]:

командно-програмна (ПК, програми управління, квитанції);

балістично-навігаційна (інформація про виміри поточних навігаційних параметрів (координат) і параметрів орбіти КА);

телеметрична (інформація про технічний стан бортових систем);

спеціальна (інформація із цільового призначення КА).

Насамперед варто підкреслити одну важливу особливість організації управління. Вона полягає в тому, що при нормальному функціонуванні КА в рішенні завдань проявляється циклічність. У зв'язку із цим можуть бути визначені технологічні цикли управління КА. Це означає, що всі операції управління

виконуються в незмінній послідовності на однакових часових інтервалах (по відпрацьованій заздалегідь структурі). Залежно від завдань, що стоять перед КА, змінюється зміст операцій управління, а їхня структура залишається незмінною в кожному циклі [3].

Основними операціями технологічного циклу управління для більшості КА є:

- планування роботи бортової апаратури й засобів наземного комплексу управління;

- закладання (видача на борт) командно-програмної інформації;

- рішення балістичних завдань (вимір координат КА й уточнення по них параметрів руху);

- контроль технічного стану КА.

Планування роботи бортової апаратури й засобів НКУ.

Рішення даного завдання проводиться групою планування ЦУП з використанням спеціально розробленого програмного забезпечення. Для реалізації процесу планування необхідна така інформація:

- зведена заявка споживачів інформації космічної системи;

- інформація про технічний стан бортової апаратури КА й засобів НКУ;

- початкові умови руху (параметри орбіти) КА;

- технологічні початкові дані (інформація про оснащення ОКВК, склад і режими роботи бортових і наземних засобів, види впливів для управління бортовою апаратурою тощо).

За отриманими початковими умовами руху здійснюється рішення балістичних завдань, що пов'язані із прогнозуванням руху КА, розрахунком трас, освітленості КА, зон радіотехнічної видимості наземних засобів. Далі здійснюється вибір робочих витків для закладання командно-програмної інформації, виміру координатної інформації, одержання телеметричної інформації й проведення спеціальних робіт і експериментів відповідно до програми польоту КА. Після цього здійснюється формування плану управління, у якому вказуються склад наземних засобів, задіяних для управління КА, перелік команд управління та час

їхньої видачі. Розроблений план управління є підставою для формування розпоряджень для ОКВК на підготовку й проведення сеансу управління КА [3].

Закладання командно-програмної інформації здійснюється шляхом видачі керуючих впливів з використанням наявних у складі НКУ командно-вимірювальних систем. У час, зазначений в плані управління, здійснюється видача разових команд на борт, закладання слів програми управління, а також прийом квитанцій, що підтверджують правильність прийому команд бортовою апаратурою [3]. Для проведення закладання командно-програмної інформації, як правило, виділяється основний і резервний робочий виток для підвищення надійності виконання розглянутої операції.

Рішення балістичних завдань. Для забезпечення процесу управління КА інформацією про положення КА в просторі необхідно періодично робити уточнення параметрів орбіти КА. Періодичність рішення даного завдання визначається параметрами орбіти КА, характеристиками засобів виміру й обробки координатної інформації, а також вимогами до точності знання параметрів орбіти, які багато у чому визначаються характеристиками апаратури БСК. Для рішення даного завдання відповідно до технологічного циклу управління здійснюється вимір координат (поточних навігаційних параметрів) на деякому вимірювальному інтервалі. Тривалість вимірювального інтервалу, а відповідно й обсяг одержуваної вимірювальної інформації, визначається збіжністю процесу уточнення початкових умов. Так, при керуванні КА «Січ», виявляється достатнім проведення вимірів на восьми витках. При цьому кількість вимірів, одержуваних на кожному витку, становить близько 120. Після нагромадження необхідного обсягу вимірів і проведення їхньої статистичної обробки (усунення аномальних вимірів і згладжування) здійснюється уточнення за ними параметрів руху, які надалі використовуються усіма учасниками процесу управління для одержання необхідних балістичних даних. Зазначений процес повторюється після закінчення строку придатності початкових умов руху. Для рішення описаних завдань у складі

ОКВК використовуються радіотехнічні й оптико-електронні засоби навігаційних вимірів. Обробка вимірювальної інформації здійснюється групою балістичного забезпечення з використанням спеціалізованого програмно-алгоритмічного забезпечення.

Контроль технічного стану КА здійснюється шляхом прийому, обробки й аналізу телеметричної інформації [2]. Даний вид інформації формується бортовою інформаційно-телеметричною системою, якою модулюються сигнали і за запитом із Землі випромінюються в напрямку наземної приймально-реєструючої станції (НПРС). Далі здійснюється виділення інформації із прийнятого сигналу, її обробка й оцінка по ній технічного стану бортової апаратури з використанням спеціального програмно-алгоритмічного забезпечення групи аналізу ЦУП. Слід зазначити, що для оперативного аналізу стану бортової апаратури в складі телеметричної інформації виділяється деякий обсяг інформації, достатній для оцінки працездатності КА. Іноді її називають телесигналізаційною інформацією. Прийом і реєстрація телесигналізаційної інформації здійснюється командно-вимірювальною системою. Обробка її здійснюється групою управління ЦУП. Дані про стан бортової апаратури використовуються при плануванні роботи бортової апаратури на черговому інтервалі планування.

1.3.2. Основні принципи взаємодії між НІК і НКУ

Від споживачів інформації видової розвідки в ЦОПІ НІК КВР надходять завдання або план розвідки. Центром космічної розвідки виробляється план роботи, який передається в операторський центр та на ППП КВР. Крім того, в операторський центр подається замовлення на знімання.

Планування роботи БЗК і БСК КА здійснює Операторський центр (ОЦ) і Центр оперативного планування (ЦОП), які входять до складу НІК. Схему роботи НІК по реалізації заявок споживачів представлено на рис. 1.8.

На базі отриманого з ЦОП оперативного плану роботи БЗК і БСК ЦУП формує програмно-командну інформацію (список

програмних команд, список разових команд і список масивів інформації) з наступною передачею їх у ЦУП для закладання на борт КА. Зведена заявка на знімання формується у відділі маркетингу ОЦ на підставі заявок, що надійшли від споживачів інформації ДЗЗ, розвідінформації і зведеної заявки, отриманої з Центра архівації і розповсюдження даних.

Планування роботи КА здійснюється в два етапи.

На першому етапі в ОЦ формується Координаційний план роботи БЗК і БСК КА (на період 7-10 доби) і направляється в ЦОП один раз на тиждень, не пізніше, ніж за четверо діб до початку дії координаційного плану.

На другому етапі в ЦОП формується Оперативний план роботи БЗК і БСК КА (на період 1-3 доби) з урахуванням прогнозу хмарності в районі зйомки і направляється в ЦУП не пізніше, ніж за 6 годин до сеансу закладання часової програми управління.

У випадку надходження екстрених заявок на зйомку в ОЦ формується екстрений координаційний план роботи БЗК і БСК КА, що направляється в ЦОП не пізніше, ніж за одну добу до початку дії координаційного плану. У ЦОП формується екстрений оперативний план роботи БЗК КА не пізніше, ніж за 1,5 години до сеансу закладання ВПУ.

Інформаційна взаємодія між структурними елементами НІК і НКУ забезпечується з використанням технічних і програмних засобів системи зв'язку і передачі даних НКУ і НІК, що у сукупності утворюють єдину інтегровану корпоративну мережу інформаційного обміну для забезпечення експлуатації космічної системи [2].

Доступ абонентів до мережі забезпечується модемами, маршрутизаторами, Ethernet-мостами, Ethernet-роутерами з використанням каналів, що комутуються, виділених аналогових, цифрових каналів зв'язку і пристроями локальних обчислювальних мереж – HUB, Switch.

Файловий обмін організується через сервери телекомунікаційних вузлів з використанням протоколів сімейства TCP/IP.

Для ідентифікації в мережі кожному абонентові привласнюється індивідуальна IP адреса.

Усі види повідомлень являють собою текстові файли в кодї ANSI.

По лініях зв'язку з НКУ передається інформація:
плани сеансів управління;
часові програми;

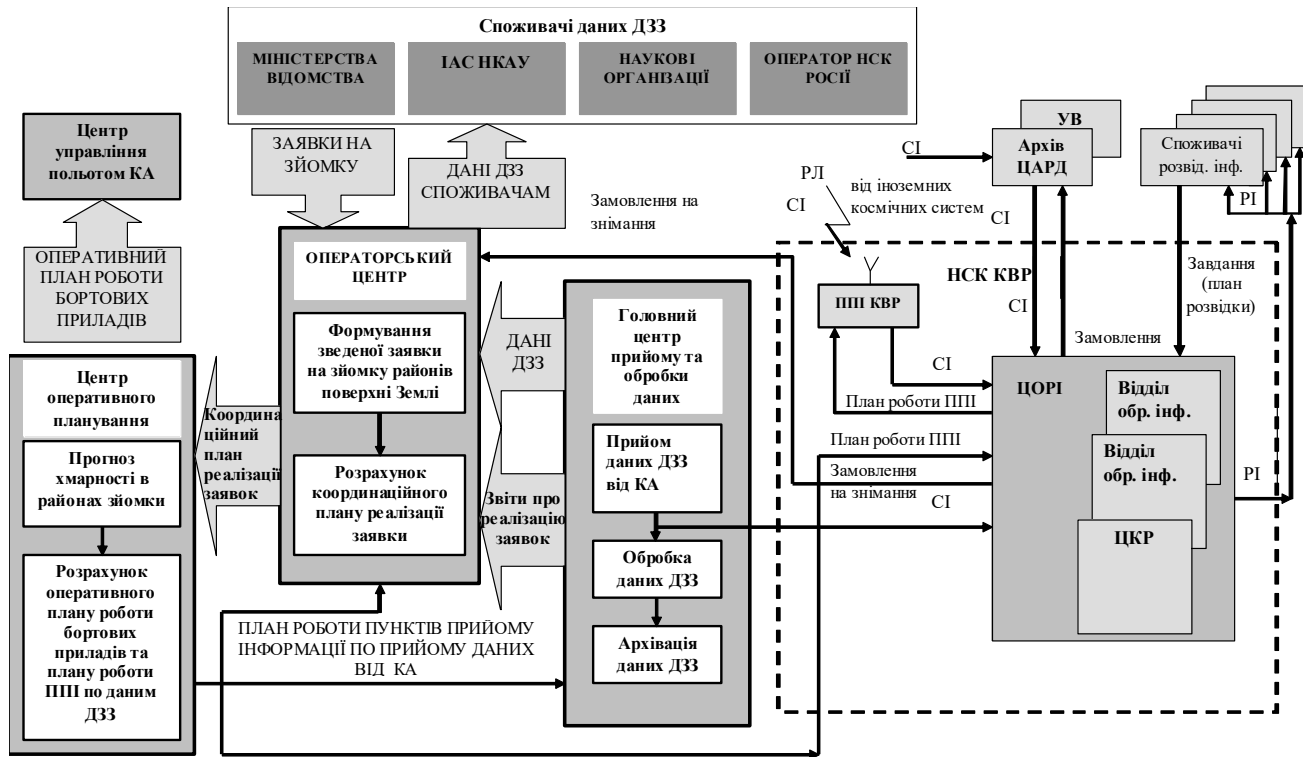


Рис. 1.8. Схема роботи наземних комплексів по реалізації заявок від споживачів

початкові умови, необхідні для розрахунку програм наведення антен, а також траєкторна інформація.

У НКУ надходять дані телеметрії, що пройшла попередню обробку.

З ОКВК у ЦУП надходять:

доповідь про видані команди;

доповідь про хід виконання сеансу управління і його результати;

доповідь про позаштатні ситуації і несправності.

З ЦУП на ОКВК надходять:

інформація про особливості майбутнього сеансу управління;

звірення програми майбутнього сеансу управління;

вказівки про зміну запланованих режимів і переліку виданих команд.

З НІК на НКУ передається така інформація:

про технічний стан НІК;

про проведені сеанси зв'язку з КА;

заявки на роботу датчиків БСК.

БСК КА під час сеансу зв'язку з НІК здійснює передачу накопиченої інформації. Інформація надходить такого типу:

спеціальна (СІ): знімки заданих районів у заданих діапазонах;

контрольна, що характеризує результат функціонального контролю апаратури БСК.

НІК КА видової розвідки здійснює обробку спеціальної інформації, отриманої під час сеансу, та видає споживачам розвідінформацію (РІ) згідно з заявками.

Взаємодія ЦОП і ЦУП здійснюється шляхом передачі масивів службової інформації за допомогою СПД.

Для забезпечення розрахунку оперативного плану роботи БЗК і БСК ЦУП передає в ЦОП таку інформацію:

початкові умови руху КА;

результати звірення часу;

план закладання числових програм управління;

облік витраченого ресурсу БЗК і БСК.

ЦОП передає в ЦУП оперативний план роботи БЗК і БСК та екстрений оперативний план роботи БЗК і БСК.

Всі інформаційні масиви, якими обмінюються ЦОП і ЦУП, підлягають збереженню протягом усього часу активного існування КА.

Питання для самоконтролю

1. Які існують види космічної розвідки?
2. Які задачі вирішує комплекс космічної видової розвідки?
3. Як виглядає структура комплексу космічної видової розвідки?
4. Які задачі вирішує наземний спеціальний комплекс?
5. Що входить до складу наземного спеціального комплексу?
6. Які задачі вирішує бортовий забезпечуючий комплекс КА видової розвідки?
7. Як виглядає структура бортового забезпечуючого комплексу?
8. Які задачі вирішує бортовий спеціальний комплекс?
9. Як виглядає структура бортового спеціального комплексу КА видової розвідки?
10. Яким чином визначаються смуга огляду (захвату) і смуга розвідки датчиків видової космічної розвідки?
11. Яким чином здійснюється інформаційна взаємодія між елементами НІК та НКУ?

РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КА ВИДОВОЇ РОЗВІДКИ

Однією з основних вимог, що пред'являються до апаратури космічної розвідки, є забезпечення виконання завдань в будь-яких метеорологічних умовах, вдень і вночі. У зв'язку з цією вимогою широке використання знаходять радіолокаційні станції.

Реальними перевагами отримання зображень земної поверхні за допомогою РЛС є такі: здатність до одночасного огляду широкої смуги місцевості; змога спостереження об'єктів, невидимих в оптичному діапазоні хвиль; змога виділення цілей, які рухаються [6].

РЛС дозволяють вести розвідку місць накопичення військової техніки (танків, автомашин тощо), окремих об'єктів, що рухаються, залізничних шляхів і шосейних доріг, трубопроводів, аеродромів і літаків на них. При цьому спостерігаються об'єкти, прикриті як природним (ліс) так і штучним маскуванням.

2.1. Радіолокатори бокового огляду

Для спостереження поверхні Землі використовують РЛС кругового і бокового оглядів [4]. Однак круговий огляд погано узгоджується з поступальним рухом космічного апарата при високих швидкостях польоту. Тому основним радіолокаційним засобом дослідження Земної поверхні з космосу (рис. 2.1) є станції бокового огляду (РЛСБО) [6].

Структурна схема такої РЛС містить у собі передавач, антенний перемикач, антену, приймач, синхронізатор, адресні лічильники, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) та запам'ятовуючий пристрій (ЗП) (рис 2.2).

Амплітуда сигналів з виходу приймача цифрується АЦП і фіксується в електронній пам'яті.

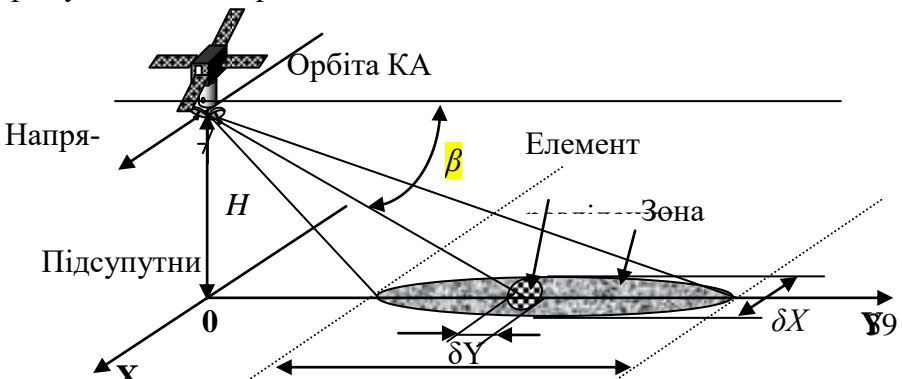


Рис.2.1. Загальні принципи отримання зображень Земної поверхні радіолокаторами бокового огляду

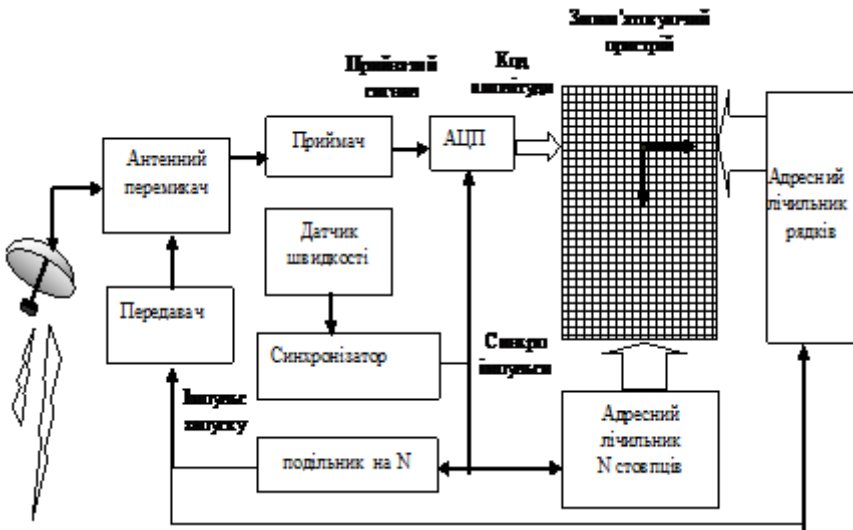


Рис.2.2. Структурна схема РЛСБО

Масиви цифрових відліків сигналу з виходу приймача цілком описують відбивну здатність ділянок місцевості, які елементарно розрізняються. Оцінки амплітуди, створювані однорядковим розгортанням дальності, записують в рядок ЗП з темпом розповсюдження сигналу поперек смуги огляду. Завершується запис рядка ЗП після приходу сигналу, відбитого від дальньої межі смуги огляду. Запис у наступний рядок ЗП почнеться після випромінювання чергового імпульсу передавача. У результаті в ЗП рядок за рядком фіксується зображення смуги

місцевості, що спостерігається. Для того щоб рядки на місцевості формувалися один за одним без прогалин та великих накладень, синхронізація запису здійснюється пропорційно швидкості пересування КА по орбіті [9].

Радіолокаційне зображення для візуального аналізу формується шляхом відображення записаного масиву відліків сигналу на екрані дисплея у вигляді точкового зображення. Кожній точці зображення на екрані дисплея відповідає один елемент розділення РЛСБО (одна чарунка ЗП). Яскравість точок на дисплеї відповідає відбивній здатності відповідних ділянок місцевості.

Коло задач, розв'язуваних РЛС огляду поверхні, насамперед визначається спостережною здатністю сигналів цілей і фону. Для оцінки спостережної здатності необхідно окремо розглядати характеристики виявлення зосереджених цілей на фоні відбиття від земної поверхні і сигналів, відбитих від фону місцевості, у шумах приймача.

Якщо потужність сигналів фону набагато перевищує потужність власних шумів приймача, а розміри цілі набагато менше розмірів елемента розділення, то відношення потужностей сигналів цілі і фону на виході лінійного прийомного тракту відповідає коефіцієнту радіолокаційної контрастності цілі [9]:

$$q_u = \frac{2\sigma_u}{\sigma_\phi \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot c \cdot \Theta \cdot H},$$

де σ_u - ЕПР цілі; σ_ϕ - питома ЕПР фону; β - кут візування елемента поверхні; Θ - ширина діаграми спрямованості антени за рівнем половинної потужності (у радіанах); H - висота орбіти КА.

Для поверхонь, що дифузно розсіюють, для яких коефіцієнт розсіювання $\sigma_\phi \sin(\beta)$ не залежить від напрямку, спостережна здатність зосереджених цілей поліпшується зі зменшенням кута β (тобто при спостереженні уздовж обрїю). Для збільшення відношення q_u необхідно зменшувати роздільну здатність уздовж шляху [6,9]

$$\delta X = \Theta \cdot R = \frac{\Theta \cdot H}{\sin(\beta)}$$

і перпендикулярно йому

$$\delta Y = \frac{c \cdot \tau}{2 \cos(\beta)}.$$

Для цього необхідно зменшувати тривалість імпульсів τ і звужувати антенний промінь (Θ). Спостережна здатність цілей погіршується зі збільшенням висоти польоту літального апарата H через зниження роздільної здатності уздовж шляху. Так, з висоти $H=300$ км, навіть при використанні кращих конструкцій сучасних бортових антен із шириною променя $\Theta = 0,002$ рад, лінійне розділення уздовж шляху при $\beta = 30^\circ$ складе приблизно 1200 м. У РЛСБО на літаках роздільна здатність підвищується до десятків метрів, що достатньо для багатьох задач дослідження Землі.

Помітимо, що площа роздільного елемента поверхні

$$S_p = \delta X \cdot \delta Y = \frac{c \cdot \tau \cdot \Theta \cdot H}{\sin(2\beta)}$$

зростає як зі зменшенням, так і зі збільшенням кута візування β . Оптимальний кут візування, для якого площа роздільного елемента мінімальна, складає 45° . Якщо допустити збільшення площі роздільного елемента удвічі, то діапазон кутів візування РЛСБО - $15^\circ \dots 75^\circ$.

На практиці смуга огляду, а отже, і діапазон кутів візування, обмежуються необхідним відношенням фон/шум, яке визначається рівнянням дальності [4,9]

$$q_\phi = \frac{P_u D_A^2 \lambda^2 \sigma_\phi \sin(\beta)}{(4\pi)^3 k \cdot T_{ш} \cdot \Delta f \cdot H^4 \cdot M \cdot \sqrt{n}},$$

де P_u - імпульсна потужність випромінювання;

D_A - коефіцієнт спрямованої дії антени;

σ_ϕ - ефективна площа розсіювання фону на площадці, що розділяється ;

k - постійна Больцмана;

$T_{ш}$ - ефективна температура приймача;

Δf - смуга перепускання приймача, погодженого із шириною спектра випромінюваних коливань;

H - висота польоту носія;

M - коефіцієнт втрат у системі;

n - кількість імпульсів, що накопичуються.

Випромінювану енергію доцільно розподіляти в межах зони огляду таким чином, щоб відношення фон/шум було постійне для будь-якої відстані в межах зони огляду. З врахуванням залежності ЕПР σ_ϕ і кількості імпульсів n , що накопичуються, від кута візування відношення фон/шум у функції цього кута виражається формулою [6]

$$q_\phi = \frac{k1 \cdot \sin^4(\beta)}{\cos(\beta) \cdot \sqrt{\sin(\beta)}},$$

де $k1$ - коефіцієнт пропорційності. Отже рівняння ідеальної діаграми спрямованості у вертикальній площині можна представити у вигляді:

$$F(\beta) = q_\phi(\beta), \text{ при } \beta_{\min} < \beta < \beta_{\max},$$

$$F(\beta) = 0, \text{ при інших } \beta.$$

Використання такої діаграми спрямованості при заданій висоті літального апарата дозволяє вести спостереження при мінімальній потужності передавача. Типові РЛСБО випромінюють сигнал потужністю в сотні кіловатів в імпульсі при середній потужності передавача порядку сотень ват.

2.2. Загальні принципи побудови та функціонування радіолокатора бокового огляду з синтезованою апертурою

Загальний принцип роботи РЛСБО з синтезованою апертурою (СА) може бути описаний таким чином [5,9].

Розміщений на борту КА високостабільний передавач випромінює електромагнітні коливання в напрямку району, що досліджується, за допомогою антени з широкою діаграмою спрямованості.

Електромагнітні коливання (сигнал опромінення), досягаючи земної поверхні, створюють зону опромінення (рис. 2.3).

Розміщені на земній поверхні об'єкти мають різноманітні відбиткові та поглинаючі здібності. У зв'язку з цим, відбитий від земної поверхні в напрямку на КА сигнал, несе у своїй структурі інформацію про відбиткові здібності об'єктів в зоні опромінення.

На борту КА відбитий сигнал приймається протягом всього часу опромінення-відбиття з фіксацією (запам'ятовуванням) амплітуд і фаз прийнятих сигналів. Після прийому сигналу, відбитого від найбільш віддаленої межі зони опромінення, передавач РЛСБО знову випромінює сигнал в напрямку зони опромінення, причому кожний наступний зондуєчий сигнал повністю відповідає першому з точністю до збереження початкової фази коливань першого сигналу. Таке випромінювання називають когерентним. Когерентність випромінювання передавача є основною умовою отримання високої розрізнявальної здатності РЛСБО з синтезованою апертурою антени [8].

Слід врахувати, що за час, який минув від початку випромінювання попереднього імпульсу до наступного (T_n), КА змістився по орбіті на відстань $L = T_n \cdot V_0$. З точки зору когерентності опромінення смуги огляду це мало суттєво, хіба що зона опромінення змістилася вздовж смуги огляду на відстань L . Але, з точки зору когерентного (з урахуванням фаз коливань) приймача, сумарний, відбитий від усіх об'єктів зони, сигнал буде мати зовсім інший розподіл амплітуд і фаз. Внаслідок цього, когерентно випромінюючи та приймаючи сигнали і запам'ятовуючи їх амплітуди і фази в різні моменти часу по мірі руху КА вздовж траєкторії на деякій ланці довжиною L_0 , можна мати повну картину амплітуд і фаз відбитих сигналів вздовж цієї ланки. Ця ланка називається ланкою синтезування апертури антени, а розподіл амплітуд і фаз сигналів вздовж ланки синтезування - радіоголограмою.

Радіоголограма, яку запам'ятовано на борту КА, може бути оброблена з метою відтворення реального радіолокаційного зображення досліджуваного району. Обробка може бути виконана

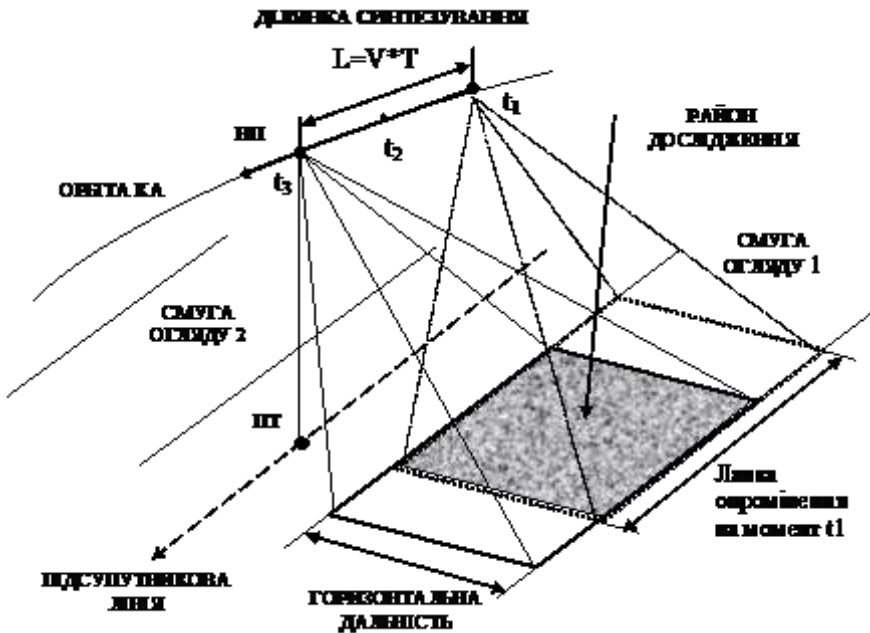


Рис. 2.3. Загальні принципи функціонування РЛБОСА

або на борту КА з наступною передачею отриманого зображення НСК, або на Землі засобами НСК, при цьому на Землю у цифровому вигляді передаються амплітуди і фази сигналів, що запам'ятовані.

Для відтворення зображення з радіоголограми можуть бути застосовані або оптичний метод обробки [5], або обробка за допомогою цифрових ЕОМ [7].

У першому випадку масиви амплітуд і фаз сигналів, що запам'ятовані, перетворюються в оптичні когерентні сигнали за допомогою електронно-променевої трубки з записом на фотоплівку. При обробці первинна фотоплівка опромінюється когерентним пучком лазерного випромінювання (рис. 2.4).

Промодульований первинною фотоплівкою когерентний пучок подається на оптичний обчислювальний пристрій, що складається з системи лінз. Пучок, що пройшов оптичний обчислювальний пристрій, проектується на вторинну фотоплівку, де

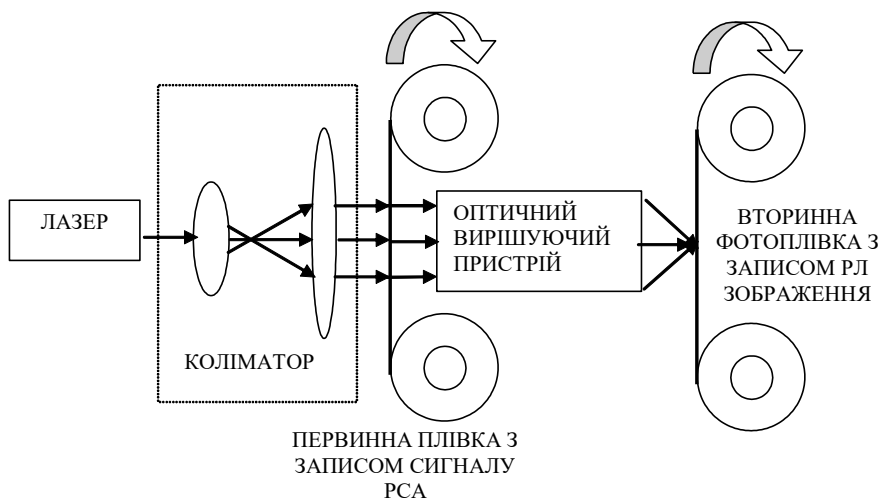


Рис. 2.4. Оптичний метод обробки радіоголограм РЛСБО

фіксується зображення. Первинна і вторинна фотоплівки рухаються синхронно з урахуванням масштабу руху КА по орбіті. Таким чином, на вторинній фотоплівці вздовж її довжини формується зображення всієї смуги огляду. Недоліком оптичної системи обробки є той факт, що на проявлення первинної і вторинної фотоплівок потрібен деякий час.

У зв'язку з істотним прогресом у розвитку мікроелектроніки і обчислювальної техніки, основна увага в наш час приділяється цифровим системам обробки (ЦСО). У ЦСО, прийнятий радіоприймачем РЛСБО, сигнал подається у вигляді послідовності чисел, для чого він перетворюється в квадратурному фазовому детекторі (КФД) в комплексний відеосигнал (для збереження інформації про початкові фази і амплітуди коливань, що приймаються), а потім дискретизується за часом і квантується за амплітудою в аналого-цифрових перетворювачах (АЦП) (рис.2.5).

Цифровий сигнал записується в оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) сигналу у вигляді послідовності кодів амплітуд і фаз сигналів, причому запис ведеться послідовно за часом

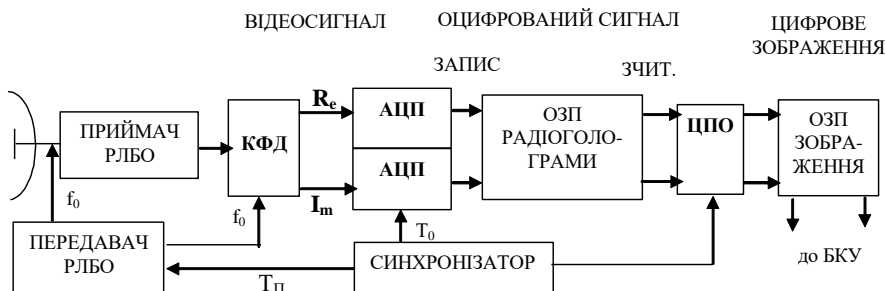


Рис. 2.5. Цифровий метод обробки радіоголограм РЛСБО

. Таким чином, за час прольоту ланки синтезування апертури в ОЗП сигналу накопичується повна інформація, яка необхідна для отримання зображення [7].

У міру подальшого просування КА по орбіті, інформація в ОЗП сигналу послідовно зсுவується, звільнюючи місце для запису інформації, що поступає знову. Зсування інформації здійснюється з кожним тактом зондування, так що звільнюється місце для інформації тільки останнього такту. Таким чином, в ОЗП сигналу завжди є інформація для відтворення радіозображення зони опромінення, що минає.

Сигнал, що зчитується з ОЗП, подається в цифровий процесор обробки (ЦПО), в якому реалізуються математичні операції синтезування апертури. З виходу ЦПО цифровий сигнал радіолокаційного зображення подається в ОЗП зображень для подальшої передачі в блок кодування та ущільнення (БКУ) БСК.

Для подальшого розглядання процесу отримання радіозображення необхідно деталізувати розглядання процесу синтезування апертури з метою отримання радіоголограм [5]. Розглянемо випадок, коли в зоні огляду РЛС є тільки один точковий відбиваючий об'єкт А (рис. 2.6).

На малих ділянках орбіти можна вважати траєкторію руху КА прямолінійною, а лінійну швидкість руху КА - постійною

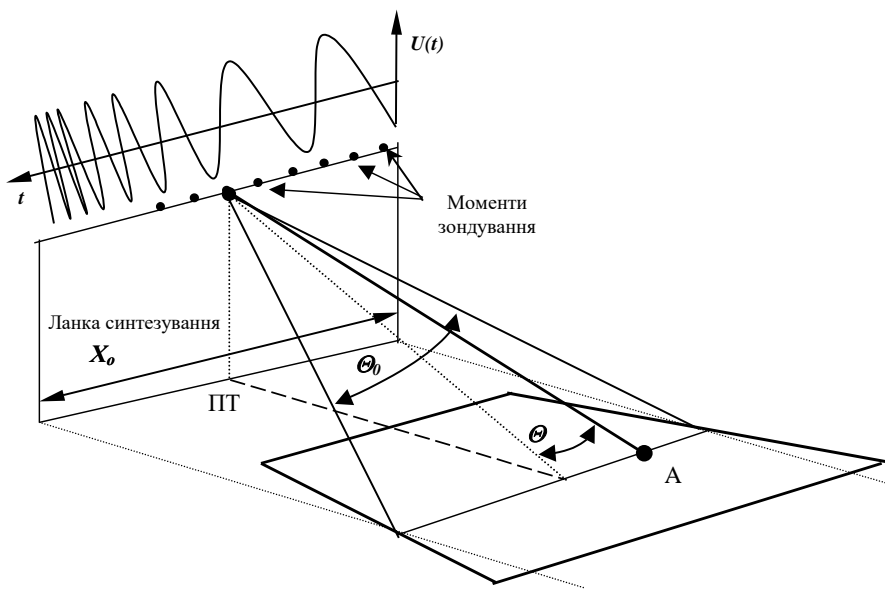


Рис. 2.6. Процес синтезування апертури в РЛСБО при спостереженні точкового об'єкта А

шляховою швидкістю V_0 . Передавач, подібно лазеру в оптичній голографії, опромінює когерентною хвилею об'єкт А. Антена РЛСБО має невеликі розміри, а значить, широкую діаграму на- правленості (з шириною θ_0) [4].

Відбиті від об'єкта А сигнали (сигнальна хвиля) поступають у приймач РЛСБО протягом всього часу, поки об'єкт знаходиться в промені антени, а саме в ланці траєкторії довжиною X_0 .

Відбитий сигнал з приймача поступає на фазовий детектор, де він перемножується з опорним сигналом (опорною хвилею), який формується передавачем. Величина сигналу на виході фазового детектора $U_{\phi d}$ (інтенсивність інтерференційної картини) визначається амплітудою і фазою відбитого сигналу.

Відбитий від точкового об'єкта А сигнал створює сферичний фазовий фронт, а опорний сигнал при незмінній за часом початковій фазі імітує плоску опорну хвилю. Тому сигнал на виході фазового детектора є голограмою точкового об'єкта А. Тривалість цього сигналу T_0 дорівнює часу, впродовж якого КА

пролітає ланку синтезування $To = Xo/Vo$. Ця радіоголограма відповідає гіпотетичній антені довжиною Xo [4]. Звідси, розрізнення з шляхової дальності можна вирахувати як

$$\delta X \geq \frac{\lambda \cdot R_a}{2X_0},$$

де λ - довжина хвилі опромінення;
 R_a - відстань від апертури до об'єкта;
 X_0 - ширина синтезованої апертури.

Зрозуміло, що чим довша ланка синтезування і менша довжина хвилі, тим вище розрізнення з шляхової дальності. Але зі зменшенням довжини хвилі при переході від сантиметрового до міліметрового діапазону, різко збільшується поглинання радіохвиль в атмосфері, а на довжину X_0 накладаються обмеження збереження когерентності випромінювання передавача за час To [6].

Крім того, максимально можлива довжина синтезованої апертури дорівнює лінійній ширині реальної діаграми спрямованості на даній дальності:

$$X_{0\max} = 2R_a \sin\left(\frac{\Theta_0}{2}\right).$$

Тому чим більша відстань до об'єкта, тим більший максимально можливий розмір синтезованої апертури. У результаті максимальна роздільна здатність РЛСБО з шляхової дальності не залежить від відстані до об'єкта і дорівнює половині довжини реальної антени: $\delta X_{\max} = L_a/2$.

Реальна розрізнявальна здатність значно гірша за максимальну. У реальних умовах польоту присутні коливання корпусу КА. Вони призводять до випадкових змін фази прийнятих сигналів. Це знижує реальну довжину синтезованої апертури. Для РЛСБО з цифровою обробкою сигналів довжина синтезованої апертури, крім того, може обмежуватися обсягом пам'яті та швидкодією пристрою обробки.

Роздільна здатність РЛСБО з нахиленої дальності забезпечується імпульсним режимом роботи і виражається співвідношенням

$$\delta R = \frac{c \cdot \tau_u}{2 \cdot k_c},$$

де c - швидкість розповсюдження радіохвиль; τ_u - тривалість зондуючого імпульсу; k_c - коефіцієнт стиснення імпульсу.

Розрізнювання з горизонтальної дальності δY , тобто на поверхні Землі (рис. 2.7), залежить як від розділення з нахиленої дальності, так і від кута нахилу променя до поверхні Землі: $\delta Y = \delta R / \sin(\alpha)$ [4].

При горизонтальних дальностях Y , порівнюваних з висотою польоту ($Y = H$), розділення на поверхні Землі по горизонтальній дальності погіршується. Тому смуга в безпосередній близькості від підсупутникової лінії не проглядається. Для поліпшення розрізнювання по горизонтальній дальності необхідно зменшувати δR шляхом застосування зондуючих сигналів з внутрішньо-імпульсною модуляцією. Як правило, застосовуються лінійно-частотно-модульовані сигнали з $k_c=50\dots 200$.

2.3. Загальні принципи попередньої обробки даних радіолокатора бокового огляду із синтезованою апертурою

2.3.1. Цифрова обробка сигналів в РЛБОСА

Розглянемо розміщення відліків сигналів, що подаються до ОЗП за час синтезування.

Інтервал дискретизації АЦП вибирається таким, щоб було не менше двох відліків (двох кодів амплітуд квадратурних каналів, тобто 4 цифрових значення) сигналу в кожному елементі розділення за дальністю δY [7]. Число відліків сигналу N_Y в періоді зондування T_{Π} визначається формулою

$$N_Y = \frac{2D_Y}{\delta Y},$$

де D_Y - ширина смуги огляду, δY - розрізнювання по горизонтальній дальності.

Число відліків сигналу по шляховій дальності N_x визначається довжиною інтервалу синтезування X_0 і темпом зондування

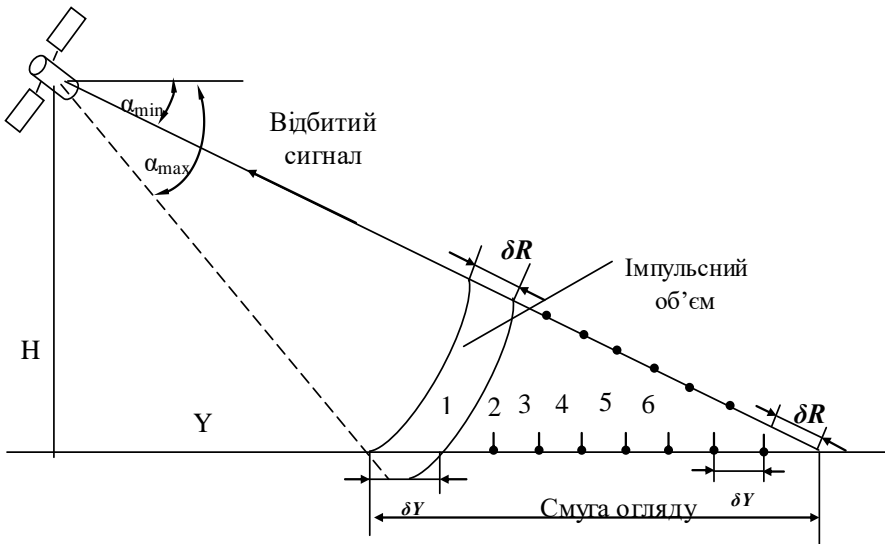


Рис. 2.7. Визначення роздільної здатності з горизонтальної дальності для РЛСБО

Т_П:

$$N_x = \frac{2X_0}{V_0 T_P},$$

де V_0 —лінійна швидкість руху КА по орбіті. Таким чином, розподіл відліків сигналу в ОЗП з прив'язкою до зони опромінення можна подати так, як показано на рис. 2.8.

У пам'яті сигналу утворюється матриця комплексних чисел (відліків) розміром $N_y N_x$.

Обробка сигналів для кожної горизонтальної дальності Y проводиться в своєму каналі. Число каналів обробки дорівнює числу відліків сигналу по дальності N_y . Кожен канал обробки отримує відліки радіоголограми тільки однієї ланки дальності і видає відліки амплітуд (яскравості) одного стовпця зображення для цієї горизонтальної дальності. Для отримання усього зобра-

ження в ОЗП записується підряд (стовпець до стовпця) інформація з усіх наступних каналів дальності (рис. 2.9).

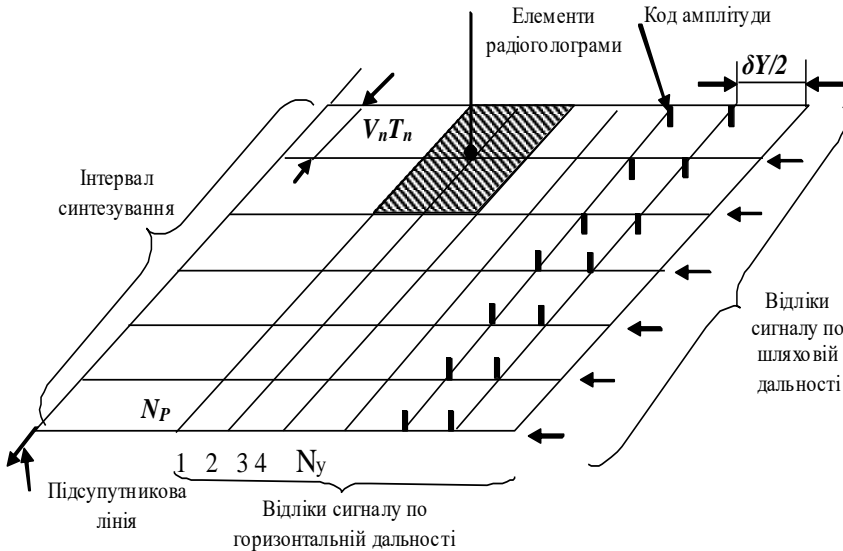


Рис. 2.8. Розподіл відліків сигналу в ОЗП РЛСБО з прив'язкою до зони опромінення

Процес обробки в одному каналі дальності можна описати виразом [7]

$$F[k, n] = \sum_{j=0}^{N_x-1} G[j, n] \cdot W[j, k],$$

де $F[k, n]$ - відлік яскравості k -тої точки n -го стовпця зображення;

k - номер відліку (точки) стовпця зображення вздовж лінії шляху;

j - номер відліку опорної функції;

$W[j, k]$ - відліки цифрової комплексної опорної функції;

$G[j, n]$ - комплексні відліки радіоголограми довжиною N_x .

По суті процес обробки сигналів у цифровій системі РЛСБО зводиться до того, щоб скласти всі відліки сигналу, який

відноситься до одного віддзеркаленого об'єкта в фазі. Відліки опорної функції $\exp(j,k)$ відіграють роль фазових повертаючих множників. Якщо траєкторія польоту КА

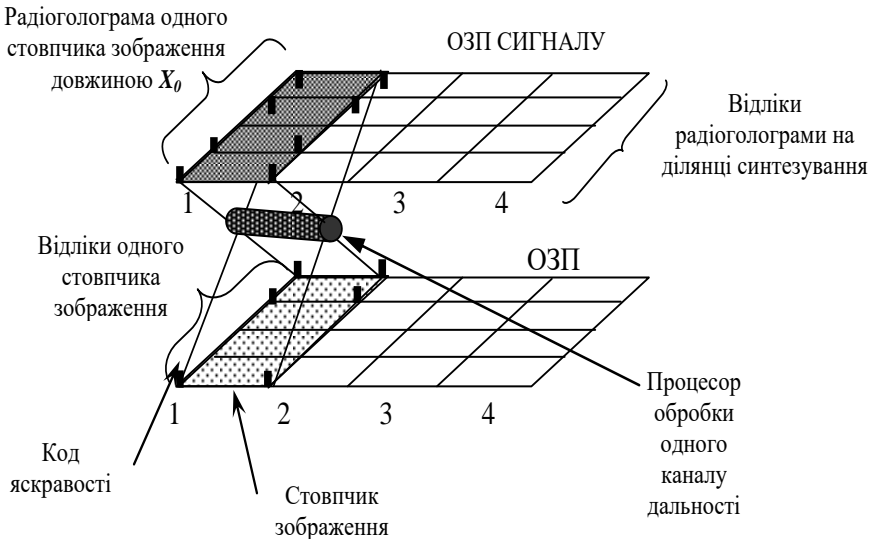


Рис.2.9. Розташування відліків сигналу для всіх стовпців зображення в ОЗП РЛСБО

на ланці синтезування прямолінійна, а когерентність випромінювання висока, то $W[j,k]$ представляють собою відліки комплексних гармонік, а процес обробки відліків радіоголограми одного каналу дальності представляє собою дискретний варіант перетворення Фур'є (ДПФ):

$$F[k, n] = \sum_{j=0}^{N_x-1} G[j, n] \cdot \exp\left(i \frac{2\pi \cdot j \cdot k}{N_x}\right).$$

Подальша попередня обробка радіолокаційного зображення проводиться в НСК. Її мета - усунення викривлень зображення, що виникають через нестабільність апаратури РЛСБО, рух КА, середовище розповсюдження радіохвиль і характеристики об'єктів, за якими ведеться спостереження. До таких викривлень відносяться масштабні викривлення, викривлення зображень, зміщення позначок цілей у зв'язку з рухом

останніх, викривлення динамічного діапазону яскравості точок зображення, погіршення роздільної здатності (детальності) зображення.

2.5. Особливості зображень, що отримані РЛБОСА

2.5.1. Класифікація об'єктів радіолокаційного спостереження

При вирішенні задач радіолокаційного спостереження всі наземні об'єкти прийнято поділяти на прості і складні.

Під простими об'єктами розуміють окремі об'єкти техніки (автомашина, танк, літак), штучні споруди (міст, будівля), а також елементи ландшафту (дерево, кущ).

Складні об'єкти представляють собою сукупність простих об'єктів, що знаходяться у певному взаємозв'язку і об'єднані певним функціональним призначенням (колона техніки, аеродром, залізнична станція, завод). До складних відносяться також топографічні об'єкти, що займають порівняно однорідні ділянки місцевості і мають певні властивості (луг, болото, ліс, річка, озеро).

З точки зору радіолокаційного спостереження об'єкти поділяються також на точкові, протяжні, площинні і групові [11].

До точкових відносяться об'єкти, розміри яких менші або дорівнюють елементу розрізнення РЛС. На РЛ зображенні такі об'єкти відображаються у вигляді точкових відміток, які не передають форму об'єкта.

Протяжні об'єкти мають один з габаритних розмірів, а площинні - обидва габаритних розміри, що істотно перевищують лінійне розділення РЛС. На РЛ зображенні ці об'єкти відображаються у вигляді витягнутих або площинних позначок, що повторюють конфігурацію об'єкта.

Групові об'єкти складаються з набору точкових, протяжних і площинних об'єктів, що займають значну площу.

2.5.2. Особливості радіолокаційних зображень

елементів місцевості та типових об'єктів

РЛС формує радіолокаційне зображення зовні подібне чорно-білому зображенню, отриманому щілинним фотоапаратом. Більш світлі тони ділянок РЛ зображень відповідають сигналам, відбитим від об'єктів і місцевості з великим коефіцієнтом відбиття [11].

Незважаючи на зовнішню подібність з фотознімками, РЛ зображення значно відрізняються від них за своїм змістом. Ці відміни обумовлені:

різним характером відбиття сигналів від місцевості і об'єктів у радіолокаційному і оптичному діапазонах;

монохроматичністю радіолокаційних сигналів;

більш низькою роздільною здатністю РЛС у порівнянні з фотоапаратами;

різними способами формування зображень.

Характер відбиття радіохвиль від земної поверхні залежить, в першу чергу, від електричних властивостей і ступеня нерівності (шершавості) цієї поверхні, а також від довжини хвилі, поляризації і кута падіння опромінюючих електромагнітних коливань.

При опроміненні земної поверхні енергія електромагнітного поля частково поглинається ґрунтом або рослинним покриттям, а частково віддзеркалюється. Чим вища електрична провідність поверхні, тим більша частина енергії віддзеркалюється. Провідність ґрунту і рослинності визначається її вологістю, тому зволожені ділянки земної поверхні віддзеркалюють електромагнітні хвилі більш інтенсивно, ніж сухі.

Кількісно відбивна здатність місцевості характеризується коефіцієнтом відбиття $K(\alpha)$, де α - кут, під яким опромінюється місцевість.

Від гладкої поверхні, розміри якої значно перевищують довжину хвилі λ радіолокатора, радіохвилі відбиваються дзеркально (рис.2.16,а). Відбиття від шершавих поверхонь носить дифузний характер. При цьому падаюча електромагнітна хвиля розсіюється у всіх напрямках і частина її повертається до радіо-

локатора (рис.2.16,б). Поверхня проміжної (середньої) шершавості розсіює незначну частину в усіх напрямках і більшу частину відбиває дзеркально (рис.2.16,в,г).

Дзеркальний або дифузний характер відбиття визначається величиною нерівності опроміненої поверхні, довжиною хвилі λ і кутом опромінення α . Вважається, що поверхня відбиває дзеркально, якщо різниця фаз $\Delta\varphi$ сигналів, відбитих від верхівок і від основи нерівностей, не перевищує $\pi/2$ (рис.2.17).

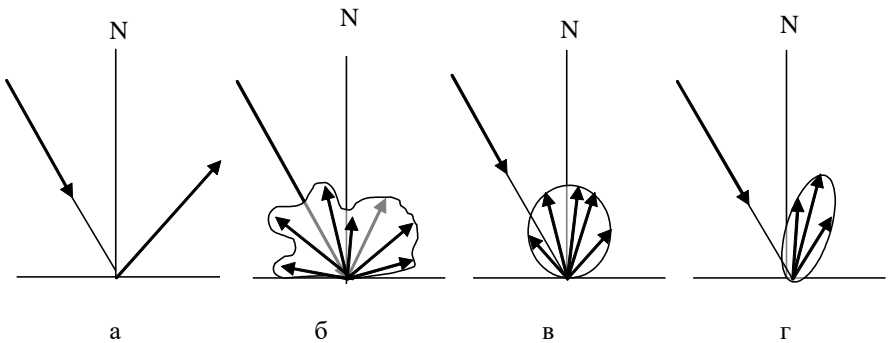


Рис.2.16. Відбиття від поверхні з різною шершавістю

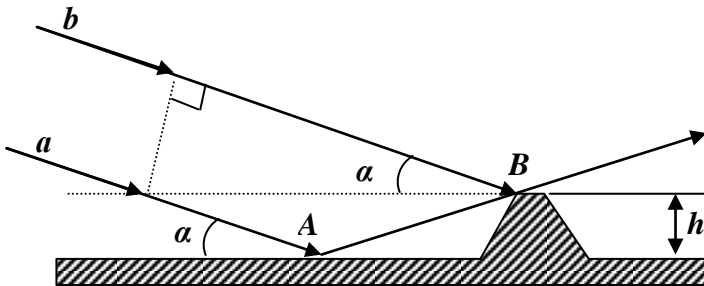


Рис. 2.17. Визначення різниці ходу променів при відбитті від місцевості

Поверхня вважається дзеркальною, якщо відношення середньоквадратичного значення висоти нерівностей σ_h до довжини хвилі λ менше $1/8$, і шершавою - якщо це відношення більше 2.

У сантиметровому діапазоні дзеркальне відображення спостерігається лише для достатньо гладких поверхонь, таких, як спокійна водяна поверхня, бетоновані злітні смуги і рулінні доріжки аеродромів тощо. Більша частина поверхні суші через наявність рослинності відбивається дифузно [11].

Електромагнітна енергія від дзеркально відбиваючих ділянок місцевості не потрапляє на антену РЛС і на РЛ зображенні ці ділянки мають темний тон, а дифузно відбиваючі - більш світлий.

Поверхня, шершава для сантиметрового діапазону хвиль, може бути дзеркальною для метрового. Тому, тон однієї й тієї ж ділянки місцевості на РЛ зображенні може виявитися світлим або темним залежно від довжини хвилі РЛС.

Характер відбиття електромагнітних хвиль від земної поверхні визначається не тільки провідністю верхнього шару ґрунту або рослинності, але й властивостями більш глибоких шарів, в які проникає електромагнітна енергія. Глибина проникнення електромагнітної енергії визначається діелектричною проникненістю матеріалу поверхні і довжиною хвилі РЛС. Діелектрична проникненість ґрунту та рослинного покриття, а відповідно, і глибина проникнення в них електромагнітних хвиль залежать, в першу чергу, від вологості [7].

Глибиною проникнення, як правило, вважають таку глибину, на якій амплітуда електромагнітної хвилі знижена до 37% її значення на поверхні. Для дуже сухих, наприклад, пустинних ґрунтів глибина проникнення може сягати десятків метрів. На більшій частині земної поверхні вологість ґрунтів така, що сигнали радіолокаційного діапазону проникають на глибину не більшу 1м. Глибина проникнення в морську воду, що має високу провідність, не перевищує декількох сантиметрів. Проникнення у прісну воду може сягати декількох метрів.

Значною може бути глибина проникнення електромагнітних хвиль у лід. Тому порівняно довгі хвилі використовують для вимірювання товщини льоду. Глибина проникнення у сніг більша, ніж у лід, тому що щільність снігу менша щільності льоду.

Вплив довжини хвилі і поляризації сигналів РЛС, а також кута опромінення місцевості на характер відбиття різний для різних поверхонь. Відбиття від поверхні з великими нерівностями (ділянки лісу, міські будови) мало залежить від довжини хвилі опромінення. У той же час коефіцієнт відбиття трав'яного покриття в діапазоні довжин хвилі від 4 до 32 мм змінюється обернено пропорційно довжині хвилі.

Складний характер має залежність коефіцієнта відбиття від поляризації хвилі. У загальному випадку, якщо площина поляризації падаючої хвилі паралельна подовженим елементам відбиваючої поверхні, більш потужним буде відбитий сигнал з тією ж поляризацією і мінімальним з ортогональною. Більша кількість випадково орієнтованих лінійних елементів дає однаковий відбитий сигнал при різноманітних поляризаціях.

Коефіцієнт відбиття водної поверхні, як правило, менший, ніж земний. Для кутів опромінення від 2° до 50° коефіцієнт відбиття майже не залежить від кута падіння і визначається станом водної поверхні, поляризацією і довжиною хвилі опромінення. При вертикальній поляризації коефіцієнт відбиття більший, ніж при горизонтальній. При вертикальній поляризації коефіцієнт відбиття мало залежить від довжини хвилі, а при горизонтальній - обернено пропорційний довжині хвилі [11].

РЛ зображення однорідних поверхонь на відміну від фотознімків мають зернисту структуру. Це зумовлено монохроматичністю випромінювання РЛС, у той час як освітлення місцевості при фотозйомках створюється сонцем або штучними джерелами, що мають широкий спектр випромінювання.

Різнманітні будови, споруди, об'єкти техніки, як правило, мають високу електропровідність. Тому вони мають великий коефіцієнт відбиття. РЛ зображення об'єктів складної форми (автомобіль, літак, корабель, споруда тощо) формується сукуп-

ністю окремих яскравих плям, що відповідають так званим "блискучим точкам" об'єктів, що утворюють сильний відбитий сигнал у напрямку на РЛС. "Блискучі точки" утворюються поверхнями об'єктів, розташованими перпендикулярно напрямку опромінення, а також елементами конструкції, що утворюють куточкові відбивачі. Конкретний вигляд РЛ зображення об'єкта складної форми залежить від його орієнтації відносно напрямку опромінення, оскільки при зміні орієнтації змінюється кількість і взаємне розташування "блискучих точок". Об'єкти або конструкції, розташовані над дзеркально відбиваючою поверхнею, наприклад міст над водою, можуть створювати багатократне відбиття.

Детальність РЛ зображення, що визначається розрізненням РЛС на місцевості, поступається детальності знімків у видимому діапазоні. При цьому, у РЛС з довгою антеною (без синтезу апертури) розділення з шляхової дальності δX погіршується при збільшенні відстані від РЛС. Розрізнення з шляхової δX дальності РЛС з синтезованою апертурою, як правило, постійне в межах всієї смуги огляду [11].

Розділення РЛС по горизонтальній дальності δY , що визначається тривалістю імпульсу τ_i і кутом опромінення місцевості α , погіршується зі зменшенням дальності. Вибираючи винос зони огляду так, щоб кут опромінення не перевищував 45^0 , можна забезпечити малу залежність розрізнення від дальності.

Таким чином, в РЛС з синтезованою апертурою може бути забезпечена практично постійна детальність РЛ зображення в межах всієї зони огляду, а в РЛС з реальною антеною (без синтезування) детальність, як правило, погіршується зі збільшенням дальності.

Ці закономірності враховуються при плануванні розвідки, вибираючи відповідним чином нахил орбіти і дальність до найбільш важливих ділянок місцевості.

Важливою особливістю РЛ зображень є наявність тіней, котрі утворюються високими об'єктами, а також піднесеними ділянками місцевості, такими як гори, пагорби, обривчасті бере-

ги річок, границі лісу. Оскільки ділянки місцевості в області радіолокаційної тіні не створюють відбитого сигналу, області тіні на РЛ зображенні мають темний тон. Тіні розташовуються на стороні піднесеності, протилежній опроміненій. Об'єкти, розташовані в області радіолокаційної тіні, на РЛ зображеннях не видимі [11].

По довжині радіолокаційної тіні можна виміряти висоту об'єкта, використовуючи геометричні співвідношення (рис. 2.18):

$$h = \frac{H \cdot R_T}{R_K},$$

де h - висота об'єкта;
 H - висота польоту носія РЛС;
 R_T - довжина радіолокаційної тіні від об'єкта;
 R_K - дальність до кінця тіні.

Відмітки об'єктів, що рухаються, на РЛ зображенні, отриманому за допомогою РЛБОСА, зміщені по шляховій дальності відносно свого вірного положення на величину, пропорційну радіальній складовій швидкості об'єкта. Наприклад, відмітка автомобіля може бути зміщена відносно РЛ зображення дороги, по якій він рухається [11].

Збільшення швидкості об'єкта приводить до ослаблення його відмітки на РЛ зображенні, а при деякій швидкості - і до її зникнення. У режимі селекції рухомих цілей ослаблюється РЛ зображення місцевості і нерухомих об'єктів і виділяються відмітки цілей, що рухаються.

Яскравість і напрямок природного освітлення об'єктів, наявність камуфлюючого забарвлення, вкривання маскувальними сітками від оптичних засобів спостереження тощо не відбиваються на РЛ зображенні об'єктів.

Особливості РЛ зображення дозволяють отримувати при їх дешифруванні якісно нову інформацію про об'єкти та місцевість у порівнянні з іншими засобами космічної розвідки.

2.5.3. Системи координат радіолокаційних зображень

Радіолокаційні станції бічного огляду дозволяють одержати радіолокаційні зображення місцевості з високої роздільною

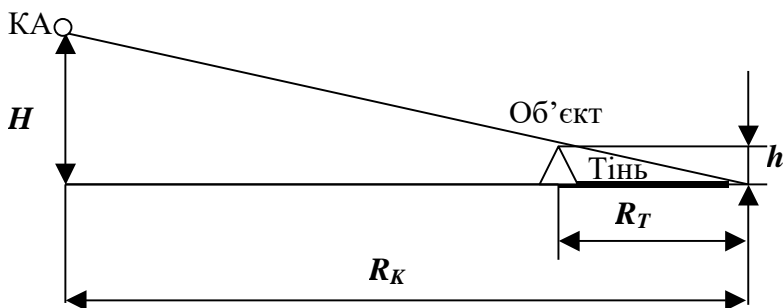


Рис.2.18. Визначення висоти об'єкта по довжині радіолокаційної тіні

здатністю в координатах, близьких до картографічних. Тому найбільш ефективно вони можуть застосовуватися для радіолокаційного картографування місцевості.

Для рішення задач картографування, як правило, використовується режим строго бічного огляду. У цьому випадку прямокутна система координат радіолокаційного зображення РЛСБО (x, y) повинна бути зв'язана з картографічними координатами [6].

Вісь x системи координат зображення відповідає на земній поверхні лінії шляху носія РЛС (з урахуванням затримки початку розгорнення). Якщо затримка початку розгорнення дорівнює висоті польоту, вісь x відповідає проекції лінії шляху на земну поверхню. При затримці більшій, ніж висота польоту, вісь x паралельна цій проекції.

Розгорнення по осі x здійснюються пропорційно швидкості польоту носія РЛСБО. Швидкість розгорнення V_{PX} автоматично регулюється системою, керованою від датчика шляхової швидкості так, щоб

$$V_{PX} = M_X V_0,$$

де V_0 - шляхова швидкість; M_X - масштабний коефіцієнт.

При строго бічному огляді вісь y системи координат зображення повинна відповідати перпендикуляру до лінії шляху. Можливі відхилення вісі y від перпендикуляра до лінії шляху обумовлюються помилками системи орієнтації і стабілізації КА і приводять до викривлень зображення (рис. 2.19).

Розгорнення по осі y здійснюються пропорційно похилій чи горизонтальній дальності. У деяких випадках робиться корегування розгорнення горизонтальної дальності з урахуванням кривизни Землі і середньої рефракції радіохвиль (рис. 2.20, а).

Позначимо відстань уздовж осі y на зображенні через l_y , тоді для розгорнення похилої дальності

$$l_y = M_Y \frac{c}{2} (t_R - t_{3P}),$$

де $t_R = 2R/c$ - час запізнювання відбитого сигналу;
 t_{3P} - час затримки початку розгорнення;
 M_Y - масштабний коефіцієнт.

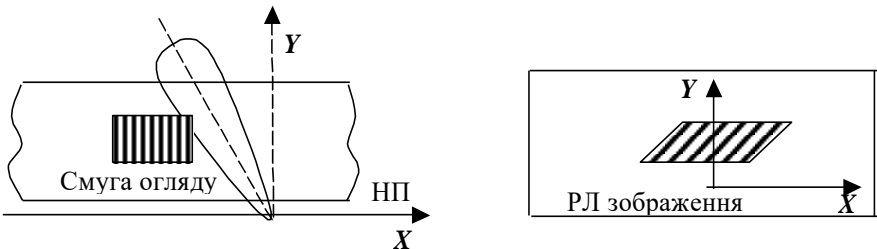


Рис. 2.19. Викривлення радіолокаційного зображення при кутових коливаннях носія

Відстань уздовж осі y на зображенні при розгорненні горизонтальної дальності

$$l_{yГ} = M_Y (Y - Y_{3P}),$$

де Y - горизонтальна дальність; Y_{3P} - відстань по горизонтальній дальності, відповідна затримці початку розгорнення.

$$Y = \sqrt{R^2 - H^2},$$

тоді

$$l_{YT} = M_Y \frac{c}{2} \left[R \sqrt{1 - \left(\frac{H}{R}\right)^2} - R_{3P} \sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_{3P}}\right)^2} \right].$$

Якщо врахувати кривизну Землі, то формула трансформується в

$$l_{YTK} = M_Y \sqrt{\frac{R_3}{R_3 + H}} \cdot \left[\sqrt{R^2 - H^2} - \sqrt{R_3^2 - H^2} \right].$$

Для врахування рефракції в першому наближенні в формулі потрібно використовувати похилу дальність до об'єкта R^* (рис. 2.20, б), яка може бути визначена як

$$R^* = \frac{c \cdot t_R}{2n},$$

де n - коефіцієнт рефракції;

t_R - фактичний час затримки відбитого сигналу.

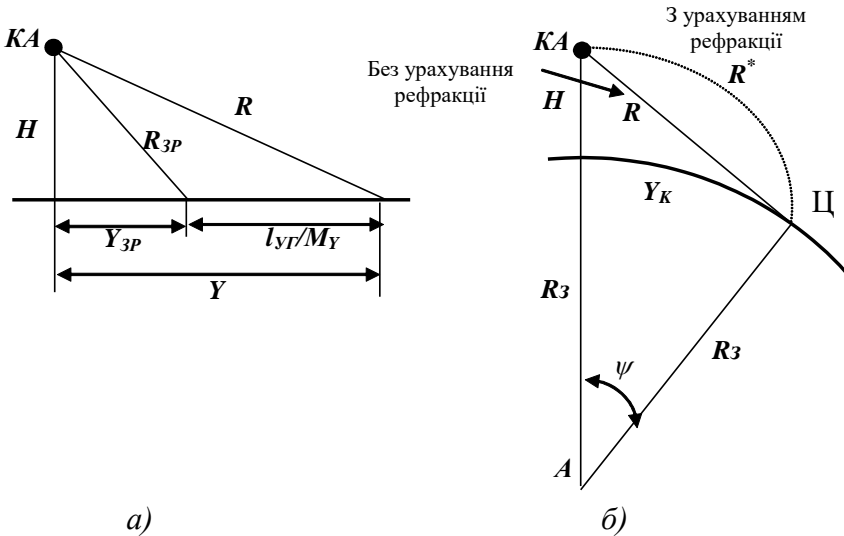


Рис.2.20. Геометричні співвідношення для розгортання горизонтальної дальності: *a)* без урахування кривизни Землі; *б)* з урахуванням кривизни Землі

Масштаб зображення по осі x визначається як

$$M_x = \frac{V_{PX}}{V_0},$$

де V_{PX} – швидкість розгорнення по вісі x ;

V_0 – лінійна швидкість КА - носія.

Масштаб зображення по осі y визначається як

$$M_y = \frac{2V_{PY}}{c \sqrt{1 + \left(\frac{H}{Y}\right)^2}},$$

де V_{PY} – швидкість розгорнення по осі y .

Слід звернути увагу, що при сталій швидкості розгорнення по осі y масштаб зображення поперек напрямку польоту стає змінним. Щоб запобігти масштабним викривленням та зробити однакові масштаби вздовж та поперек РЛ знімка, швидкості розгорнення вибирають з умови

$$M_x = M_y = \frac{V_{PX}}{V_0} = \frac{2V_{PY}(Y)}{c}.$$

Швидкість горизонтального розгорнення робиться змінною залежно від горизонтальної відстані Y

$$V_{PY} = V_{PY0} \sqrt{1 + \left(\frac{H}{Y}\right)^2},$$

де V_{PY0} - швидкість розгорнення поперек смуги огляду для $H=0$.

Для РЛБО з цифровим записом сигналу це означає, що темп дискретизації сигналу повинен зростати від початку запису рядка до його кінця [7].

Питання для самоконтролю

1. Як виглядає структура радіолокатора бокового огляду?

2. Які загальні принципи отримання зображень земної поверхні радіолокаторами бокового огляду?
3. Як виглядає рівняння ідеальної діаграми спрямованості у вертикальній площині?
4. У чому полягає суть оптичного методу відтворення зображення з радіоголограми?
5. У чому полягає суть цифрового методу відтворення зображення з радіоголограми?
6. У чому полягає суть процесу синтезування апертури в радіолокаторах бокового огляду?
7. Як виглядає структура скануючого радіометра?
8. Які загальні принципи отримання зображень за допомогою скануючого радіометра?
9. Яким чином сигнал подається в пам'яті радіолокатора бокового огляду?
10. Яким чином здійснюється фотооптична реєстрація сигналів в радіолокаторах бокового огляду з синтезованою апертурою?
11. Як класифікуються об'єкти радіолокаційного спостереження?
12. У чому полягають особливості радіолокаційних зображень відносно зображень в видимому діапазоні хвиль?

РОЗДІЛ 3

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ДАТЧИКИ ЗОБРАЖЕНЬ БОРТОВОГО СПЕЦІАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ КА ВИДОВОЇ РОЗВІДКИ

3.1. Характеристика об'єктів земної поверхні при природному освітленні

3.1.1. Основні відомості з фотометрії

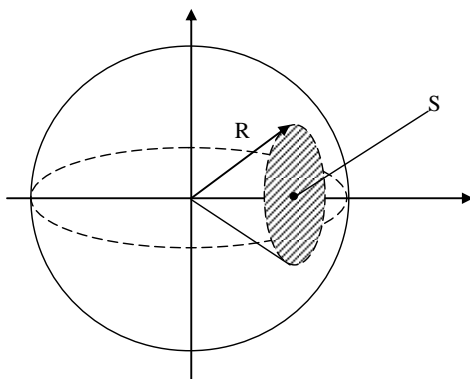
Фотометрія - це розділ геометричної оптики, що вивчає методи вимірювання світлової енергії, яка переноситься світловими хвилями від джерела світла.

Розглянемо коротко характеристики основних фотометричних величин і понять [11,12,16,20].

Тілесним кутом називають частину кулі, обмежену радіусами і конічною поверхнею. Одиницею тілесного кута є стерадіан - тілесний кут з вершиною в центрі кулі, що вирізає на кулі поверхню, площа якої дорівнює квадрату радіуса кулі:

$$\Omega = \frac{S}{r^2}.$$

де S - площа частини кульової поверхні; r - радіус кулі.



Світловий потік Φ - це потік променистої енергії, потужність якого оцінюють за створеним ним світловим відчуттям.

Одиницею світлового потоку є люмен (лм) - світловий потік, що випускає точкове джерело в тілесному куті 1 стерadian (ср) при силі світла 1 кандела (кд).

І навпаки, силою світла характеризується світловий потік, який випромінюється в певному напрямі, її визначають за формулою:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}, \quad (3.1)$$

де Φ - світловий потік, лм; Ω - тілесний кут, в якому поширюється світловий потік, ср.

Кандела – є сила світла у заданому напрямі джерела, що випускає монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого у цьому напрямі становить $1/683$ Вт/ср.

Освітленість - відношення світлового потоку до площі освітлюваної поверхні

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad (3.2)$$

де S - освітлювана поверхня, м^2 .

Одиницею освітленості є люкс (лк) - освітленість, яку створює світловий потік в 1 лм при рівномірному розподілі його на площі 1 м^2 .

Освітленість можна виразити і залежно від сили світла, оскільки 1 лк — це освітленість, яку створює точкове джерело силою світла в 1 кд на поверхні в 1 м^2 , що лежить на відстані 1 м від джерела.

З формули (3.1) випливає, що $\Phi = I\Omega$, а величина тілесного кута

$$\Omega = \frac{S}{r^2}.$$

Підставивши два останні вирази у формулу освітленості (3.2), отримуємо

$$E = \frac{I}{r_2}.$$

Отже, освітленість поверхні пропорційна силі світла джерела і обернено пропорційна квадрату відстані від джерела до освітлюваної поверхні.

Світимість – відношення елементарного світлового потоку, що йде від малої ділянки, до площі даної ділянки:

$$M = \frac{d\hat{O}}{dS} \text{ (лм/м}^2\text{)}.$$

Поняття «світимість» використовується при опису світлового потоку від світних поверхонь: екранів ПЕОМ, світильників освітлення, що мають площу (не точкових).

Експозиція - добуток освітленості фотоприймача на час його освітлення

$$H = E \cdot t,$$

де t - час освітлення, с.

Одиницею експозиції є люкс-секунда (лк·с).

Яскравість - відношення сили світла, що поширюється від джерела в певному напрямі, до площі світної поверхні, яку видно в тому ж самому напрямі.

Яскравість поверхні залежить не тільки від її освітленості, а й від відбивної здатності цієї поверхні.

Яскравість світла вимірюють силою світла з одиниці рівномірно світної поверхні джерела в напрямку нормалі

$L = \frac{I}{S} = \left[\frac{\hat{e}\hat{a}}{\hat{i}^2} \right] = [I^{\beta}\hat{o}] = \pi[\hat{a}\hat{n}\hat{a}].$ Якщо світна поверхня похила, то

застосовують формулу

$$L = \frac{I}{S \cos \alpha},$$

де L - яскравість світла; I - сила світла; S - площа світної поверхні; α - кут нахилу світної поверхні.

Одиницею вимірювання яскравості є кандела на квадратний метр (кд/м²).

3.1.2. Освітленість ландшафту

При денному фотографуванні ландшафт освітлюється Сонцем. Величина природної денної освітленості ландшафту визначається як астрономо-географічними, так і метеорологічними факторами. До першої групи відносяться широта і довгота місцевості, дата і час доби знімання. Параметри цієї групи визначають висоту Сонця над обрієм. В свою чергу висота Сонця є найбільш визначною для освітленості поверхні Землі. Друга група факторів містить у собі хмарність, стан атмосфери і земної поверхні [17].

Сумарна освітленість E земної поверхні складається з трьох складових, кожна з яких залежить від ряду факторів і змінюється за часом:

$$E = E_n + E_p + E_c, \quad (3.3)$$

де

E_n - освітленість прямими променями Сонця;

E_p - освітленість, створювана променями світла, розсіяного в атмосфері;

E_c - освітленість, обумовлена променями світла, відбитого від сусідніх яскравих об'єктів.

Найбільше значення з трьох складових мають перші дві. Об'єкти, що знаходяться під дією сонячних променів, висвітлюються одночасно як прямими сонячними променями, так і світлом, розсіяним атмосферою і хмарами. Освітленість об'єктів у тіні створюється тільки за рахунок розсіяного світла.

Освітленість прямим і розсіяним світлом зв'язана з висотою Сонця над горизонтом. Інтенсивність прямої освітленості може бути знайдена для безхмарної атмосфери з рівняння:

$$E_i = E_0 p^{(\sec Z_c)} \cos Z_c, \quad (3.4)$$

де E_0 - освітленість, створювана Сонцем за межами атмосфери («космічна» освітленість). Її величина дорівнює у середньому 134 000 лк; p - коефіцієнт прозорості шарів атмосфери. Для середніх атмосферно-оптичних умов його величина дорівнює 0,75 (коли Сонце знаходиться в зеніті); Z_c - зенітна відстань Сонця, тобто кут між вертикаллю і напрямком на Сонце.

Цим виразом можна користуватися для розрахунку освітленості при

$$Z_c \leq 80^\circ.$$

При малих висотах Сонця над обрієм ($Z_c > 80^\circ$) вводяться відповідні поправки.

Визначення другої складової (E_p) аналітичним шляхом зв'язано з певними труднощами. Якщо вважати яскравість небосхилу L_n рівномірною, то освітленість E_p , створювану розсіяним світлом, можна з достатнім ступенем точності знайти з виразу

$$E_p = \pi L_n. \quad (3.5)$$

Даний вираз не зв'язує E з висотою Сонця.

Величина L_n визначається експериментально.

Як освітленість на Сонці $E_n + E_p$, так і освітленість у тіні E_p , змінюючись протягом дня, досягають максимального значення в астрономічний полудень. Сильно змінюється також протягом дня і співвідношення між освітленістю на Сонці й у тіні. Так, якщо при малих висотах Сонця над обрієм, це співвідношення близьке до одиниці, то опівдні освітленість на Сонці більш ніж у п'ять разів може перевищувати освітленість у тіні (рис. 3.1).

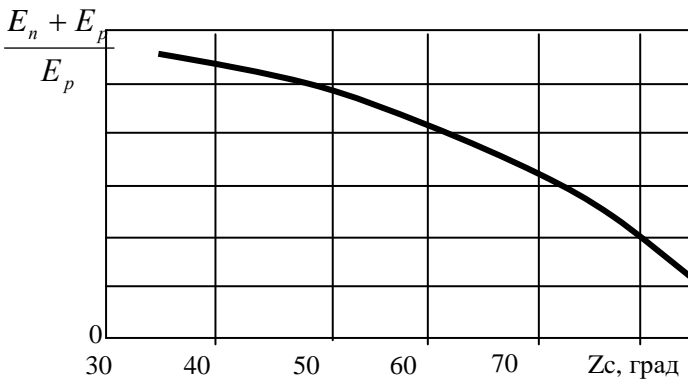


Рис.3.1. Співвідношення між освітленістю земної поверхні на сонці та у тіні

Особливо великий вплив на освітленість ландшафту здійснює хмарність. Залежно від характеру хмар і інтенсивності хмарності освітленість може помітно зменшуватися. Так при сильній су-

цілній хмарності освітленість може зменшуватися у 2-5 разів. При частковому покритті небосхилу хмарами різко росте значення E_p і відповідно за рахунок цього збільшується освітленість на Сонці $E_n + E_p$. Це збільшення порівняно невелике, коли Сонце близько до обрію і різко зростає зі зменшенням Z_c .

На рис. 3.2 показана зміна освітленості на Сонці й у тіні при різних умовах освітлення. З порівняння кривих видно, що у похмуру погоду освітленість ландшафту відповідає тій, яка буває в тіні при безхмарній погоді.

Спектральний характер освітленості на Сонці й у тіні також змінюється зі зміною положення Сонця на небосхилі. Зміна розсіяної освітленості спостерігається візуально, як зміна кольору неба. Зміна спектрального складу прямого сонячного світла особливо помітна при малих висотах Сонця: сонячний диск при його наближенні до обрію набуває червонуватого відтінку.

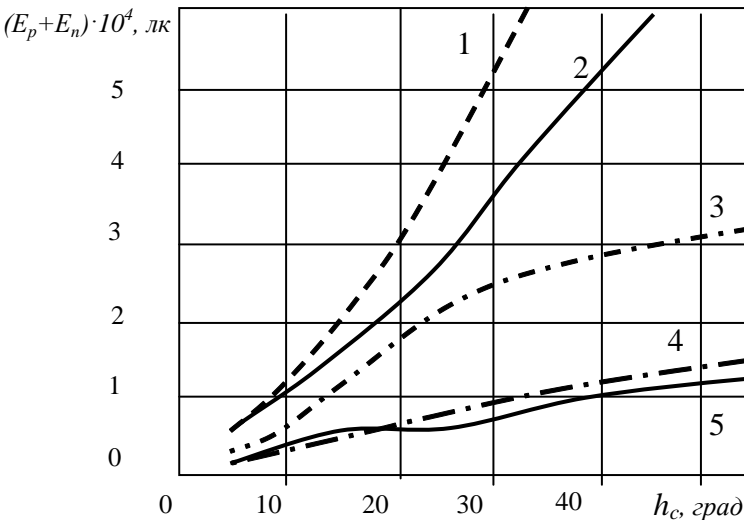


Рис. 3.2. Зміна освітленості на сонці та у тіні $E_p + E_n$ (h_c – висота стояння Сонця) при різних умовах освітлення: 1 - висококучеві хмари, на сонці; 2 - безхмарно, на сонці; 3 - висококучеві хмари, у тіні; 4 - безхмарно, в тіні; 5 - суцільна хмарність

Характерно, що зміна протягом дня спектрального складу прямої і розсіяної освітленості не позначається на спектральному складі сумарного денного світла. При зміні Z_c від 40° до 80° розподіл спектрального складу сумарної денної освітленості залишається практично без змін (рис. 3.3). Така сталість зберігається до висоти Сонця над обрієм 5° ввечері і 15° вранці. У міру подальшого збільшення спостерігається збільшення синіх променів у сумарній освітленості.

Незмінність за спектральним складом сумарної освітленості ландшафту протягом дня має велике практичне значення для космічного знімання, особливо при отриманні багатоканальних знімків[16].

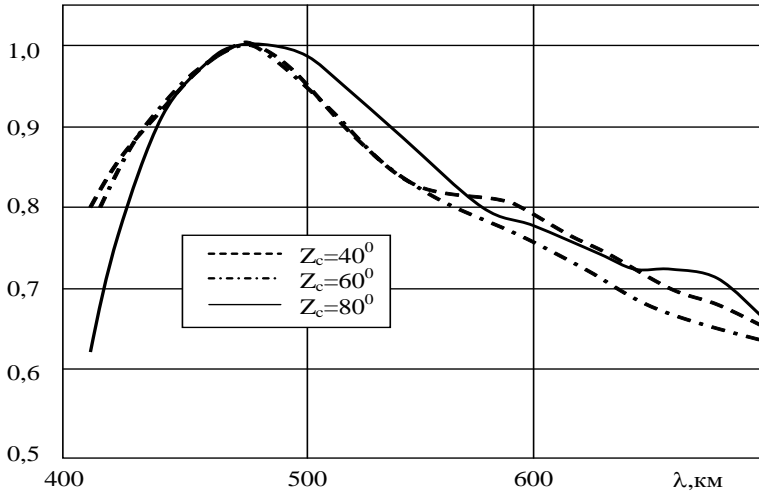


Рис. 3.3. Спектральний склад сумарної денної освітленості

3.1.3. Яскравість ландшафту

Для космічного і повітряного знімання, також як і для візуального спостереження, дуже велике значення має яскравість об'єктів, що спостерігаються. Як зорове відчуття, так і фотографічний ефект пропорційні логарифму яскравості об'єкта спостереження, причому ця залежність зберігається в широкому діапазоні яскравостей.

Велике практичне значення при зніманні має інтегральна чи середня яскравість ландшафту, що визначає ту сумарну кількість освітлення, що одержує світлочутливий шар за даними умовами знімання. Тому середня яскравість ландшафту є вихідним фотометричним параметром при визначенні експозиції.

Ландшафт являє собою сукупність окремих елементів (деталей) з визначеною яскравістю і з деякою площею стосовно усієї ділянки місцевості, що знімається [16,17]. Позначимо яскравості окремих елементів ландшафту через

$$L_1, L_2, \dots, L_n,$$

а їх площі відповідно через

$$S_1, S_2, \dots, S_n.$$

Тоді середню яскравість ландшафту можна представити таким виразом:

$$\bar{L} = \frac{\sum L_i S_i}{\sum S_i},$$

тобто під середньою яскравістю ландшафту розуміється середнє фотометричне значення всіх елементів яскравості даної ситуації. Звичайно в практиці знімання для розрахунків використовують коефіцієнт яскравості як величину, що не залежить від умов висвітлення ландшафту.

Лише для невеликої кількості об'єктів коефіцієнт яскравості однаковий для всіх променів спектра. Такі об'єкти називаються оптично нейтральними (сірими). Більшість об'єктів, що складають ландшафт, мають фарбування, тобто і їхній коефіцієнт яскравості змінюється залежно від довжини хвилі падаючого на них світла. Однак для практичних розрахунків можна коефіцієнти яскравості таких об'єктів порівнювати між собою і з яскравістю оптично нейтральних об'єктів.

Аналогічно поняттю середньої яскравості існує поняття середній коефіцієнт яскравості ландшафту \bar{r} , що може бути знайдений з виразу

$$\bar{r} = \frac{\sum r_i S_i}{\sum S_i}.$$

Експериментально знайдені такі значення середнього коефіцієнта яскравості [17]:

літній ландшафт $\bar{r} = 0,14$,

зимовий ландшафт $\bar{r} = 0,50$,

весняний і осінній ландшафт $\bar{r} = 0,12$.

Ці величини звичайно використовують на практиці для визначення експозиції при зніманні.

При зніманні істотним є інтервал яскравостей ландшафту. Інтервал яскравостей визначає діапазон освітленості світлочутливого шару у фокальній площині датчика.

Якщо яскравість найбільш світлої ділянки ландшафту позначити L_{max} , а найбільш темної - L_{min} , то відношення цих яскравостей називається інтервалом яскравостей:

$$U = \frac{L_{max}}{L_{min}} = \frac{\bar{r}_{max}}{\bar{r}_{min}}. \quad (3.6)$$

Іноді для розрахунків зручніше виражати інтервал яскравостей у логарифмічній формі:

$$l_0 = \lg U = \lg \frac{L_{max}}{L_{min}} = \lg L_{max} - \lg L_{min}. \quad (3.7)$$

$$l_0 = \lg U = \lg \frac{\bar{r}_{max}}{\bar{r}_{min}} = \lg \bar{r}_{max} - \lg \bar{r}_{min}, \quad (3.8)$$

Значення інтервалу яскравостей приведено в табл. 3.1.

Величина інтервалу яскравостей залежить від ряду факторів і насамперед від освітленості E . Якщо об'єкти, що визначають інтервал яскравостей, освітлені нерівномірно (наприклад, один з них знаходиться на Сонці, а інший - у тіні), то інтервал яскравостей виявиться відношенням

$$U = \frac{\bar{r}_{max} E_1}{\bar{r}_{min} E_2},$$

де E_1 і E_2 - освітленості двох порівнювальних об'єктів.

Таблиця 3.1

Значення інтервалу яскравостей

Вид ландшафту		U	l_0
Зимовий	середнє значення	10 : 1	1.0
	максимальне значення	50 : 1	1.7
Літній (без- сніговий)	середнє значення	10 : 1	1.0
	максимальне значення	30 : 1	1.18
	мінімальне значення	8 : 1	0.8

3.1.4. Поняття контрастності ландшафту

Розпізнавання об'єктів на знімку можливо лише завдяки розходженню в оптичних щільностях (яскравостях) зображень двох розташованих поруч цих об'єктів чи об'єкта і фону. Мірою цього розходження служить контраст, що визначається як відносна різниця фотометричних параметрів (яскравість, коефіцієнт яскравості, оптична щільність) двох суміжних об'єктів або об'єкта і фону [17].

Можливі такі способи виразу величини контрасту. Нехай контраст, складений двома об'єктами, яскравості яких рівні L_1 і L_2 , і нехай $L_1 > L_2$. Тоді найбільш розповсюдженому розумінню контрасту буде відповідати формула:

$$K_1 = \frac{L_1 - L_2}{L_1} = 1 - \frac{D_2}{D_1}. \quad (3.9)$$

У цьому випадку можливі значення K_1 визначаються нерівністю $0 < K_1 < 1$.

Іншому розумінню контрасту відповідає вираз:

$$K_2 = \frac{L_1 - L_2}{L_2} = \frac{D_1}{D_2} - 1, \quad (3.10)$$

при цьому можливі значення K_2 визначаються нерівністю $0 < K_2 < \infty$.

Часто для виразу контрасту використовується формула:

$$K_3 = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2}. \quad (3.11)$$

Можливі значення K_3 у цьому випадку знаходяться у тому ж діапазоні, що і значення, які приймає K_1 .

Співвідношення значень контрасту, обчисленого за формулами (3.9), (3.10) і (3.11), показано на графіку (рис. 3.4). При складанні графіка передбачалося, що L_1 не рівне 1, а L_2 змінюється від 0 до 1.

Для порівняння яскравостей L_1 і L_2 двох суміжних елементів окремого об'єкта користуються величиною деталі яскравості рівною:

$$\Delta = \lg \frac{L_1}{L_2} = \lg \frac{\bar{r}_1}{\bar{r}_2}.$$

Аналіз розподілу деталей яскравості для типових ландшафтів (ліс, населений пункт, степ тощо) показує, що найбільш часто в ландшафті зустрічаються дуже малі значення деталі яскравості ($\Delta < 0,1$). Число елементів ландшафту, що мають велике значення Δ , різко зменшується зі збільшенням Δ (рис. 3.5). Це відноситься як до літнього, так і до зимового ландшафту. Звідси випливає, що складність відтворення ландшафту на зображенні полягає в передачі не тільки дрібних об'єктів, але і дуже малих контрастів.

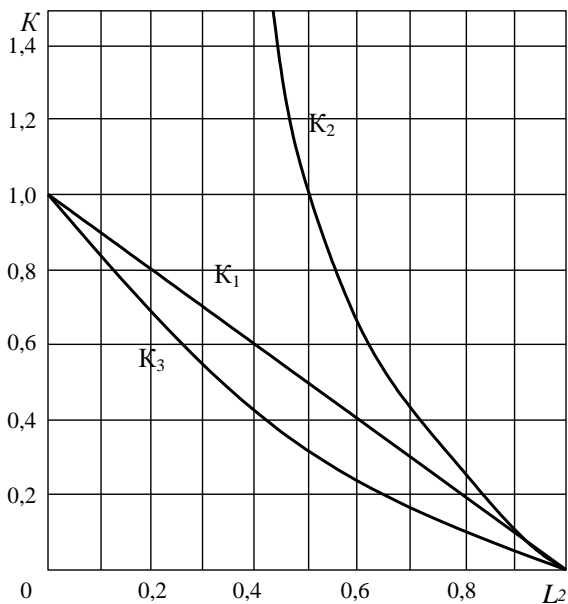


Рис.3.4. Залежність між K_1 , K_2 і K_3

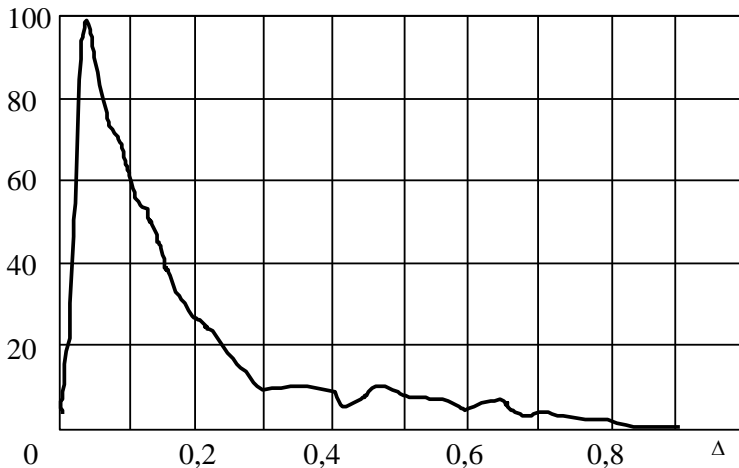


Рис.3.5. Відносний розподіл значень деталі яскравості земної поверхні

3.2. Спектральна класифікація об'єктів

З усього різноманіття елементів, що складають ландшафт, лише деякі об'єкти є оптично нейтральними (сірими), коефіцієнти яскравості яких однакові для всіх променів спектра. Більшість же об'єктів мають фарбування і їхній коефіцієнт яскравості змінюється залежно від довжини хвилі. Тому для повної характеристики об'єктів ландшафту необхідно вимірювати спектральні чи монохроматичні коефіцієнти яскравості [14,17].

Спектральні коефіцієнти яскравості визначаються методом фотографічної фотометрії. Визначивши по всьому спектру через рівні проміжки, будують криву. Вивченню спектральної відбивної здатності різних природних і штучних об'єктів присвячено ряд робіт, що проводилися Г. А. Тиховим, В. В. Шароновим, Е. Л. Криновим і іншими. Найбільш повні дослідження виконали Е. Л. Криновим, що визначив спектральні коефіцієнти яскравості близько 400 об'єктів при різних умовах висвітлення. Усі природні об'єкти за характером спектральних коефіцієнтів яскравості Е. Л. Кринов розділив на три класи; кожен клас, у свою чергу, поділяється на типи.

Нижче приводиться класифікація Е. Л. Кринова [17].

Клас I. «Оголення і ґрунти».

Тип 1. Ґрунти чорноземні і супіщані, ґрунтові дороги й інші об'єкти.

Тип 2. Ґрунти підзолисті, суглинні й інші, шосейні дороги, деякі типи будівель.

Тип 3. Піски, різні оголення пустелі, деякі гірські породи.

Тип 4. Вапняк, глина і деякі інші найбільш світлі об'єкти.

Клас II. «Рослинні утворення».

Тип 1. Хвойні породи лісових насаджень у зимовий період.

Тип 2. Хвойні породи лісових насаджень у літній період, суходільні луки і трав'яні покриви з недостатньо соковитою рослинністю.

Тип 3. Лісові насадження листяних порід у літній період і всі трав'яні покриви з густою і соковитою рослинністю.

Тип 4. Лісові насадження в період осіннього розфарбування і дозрілі (пожовтілі) польові культури.

Клас III. «Водяні поверхні, водойми і сніговий покрив».

Тип 1. Сніг, покритий крижаною кіркою.

Тип 2. Сніг, що тільки випав.

Тип 3. Водяна поверхня під деяким досить великим кутом до нормалі, тобто, що відбиває блакитне небо.

Усереднена характеристика всіх приведених вище типів природних об'єктів зображена на рис. 3.6.

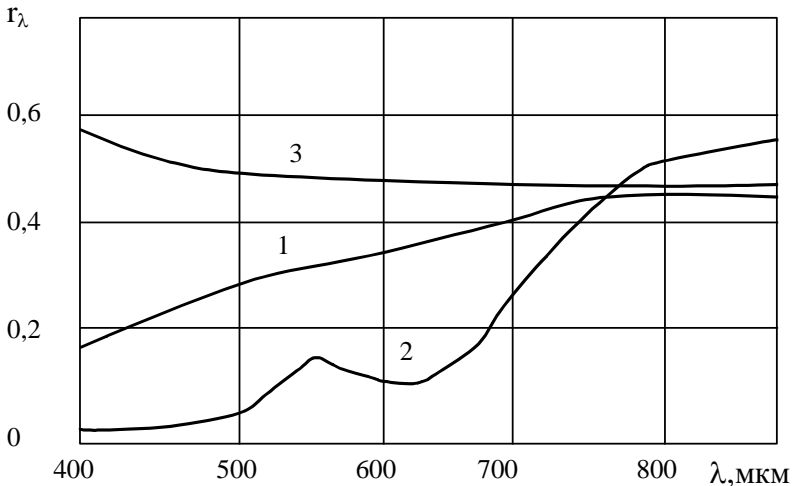


Рис.3.6. Усереднені характеристики r_λ для трьох класів

Для першого класу характерна невелика абсолютна величина r_λ , що поступово збільшується зі збільшенням довжини хвилі. Другий клас поєднує криві, що володіють характерним максимумом відображення у видимій частині спектра близько 550 нм (найбільше відображення для хлорофілу). Далі в зоні 600-700 нм спостерігається мінімум, що відповідає смузі поглинання хлорофілу. У інфрачервоній зоні для усіх видів рослинності крива різко підвищується.

Третій клас об'єктів характеризується тим, що криві спектральної відбивної здатності різко відрізняються від кривих об'єктів першого класу, а саме: великі абсолютні значення коефіцієнтів яскравості і зниження величини з переходом у довгохвильову частину спектра.

Сукупність яскравісних особливостей окремих об'єктів ланд-

шафту дозволяє з метою практики знімання виділити два характерних види ландшафту:

1. Зимовий (нейтральний чи ахроматичний) ландшафт. Цей вид ландшафту визначається наявністю снігового покриву і характеризується високим середнім коефіцієнтом яскравості і його сталістю в широкому діапазоні (400-800 нм).

2. Літній (хроматичний) ландшафт. Визначається відсутністю снігового покриву чи суцільної водяної поверхні. Характеризується невисоким середнім коефіцієнтом яскравості і його різким зростанням зі збільшенням довжини хвилі (із провалом для рослинних утворень у зоні 680- 690 нм).

Залежно від виду ландшафту і переваги в ньому тих чи інших типів об'єктів варто вибирати відповідну зону спектра і використовувати приймач з визначеною спектральною чутливістю.

3.3. Взаємодія оптичного випромінювання із середовищем

При поширенні оптичного випромінювання в речовині відбуваються різні явища [11,12,13,20,21,27]:

відбиття і заломлення на границі розділу двох різних середовищ;

поглинання;

розсіювання;

посилення;

зміна поляризації випромінювання;

змушене розсіювання, параметрична генерація світла, затемнення і провітління середовища тощо).

3.3.1. Відбиття і заломлення оптичного випромінювання

Формальна теорія відбиття і заломлення світла будується з врахуванням граничних умов, яким задовольняють вектори електромагнітного поля на межі розділення двох середовищ [11].

Розглянемо два безперервних середовища, на межі розділення яких нема поверхових зарядів та струмів (рис. 3.7). У цьому випадку на межі повинні бути безперервними тангенційні складові векторів E і H . Ці умови є наслідками рівнянь Максвелла в інтегральній формі, а тому вони вірні для всяких суцільних середовищ.

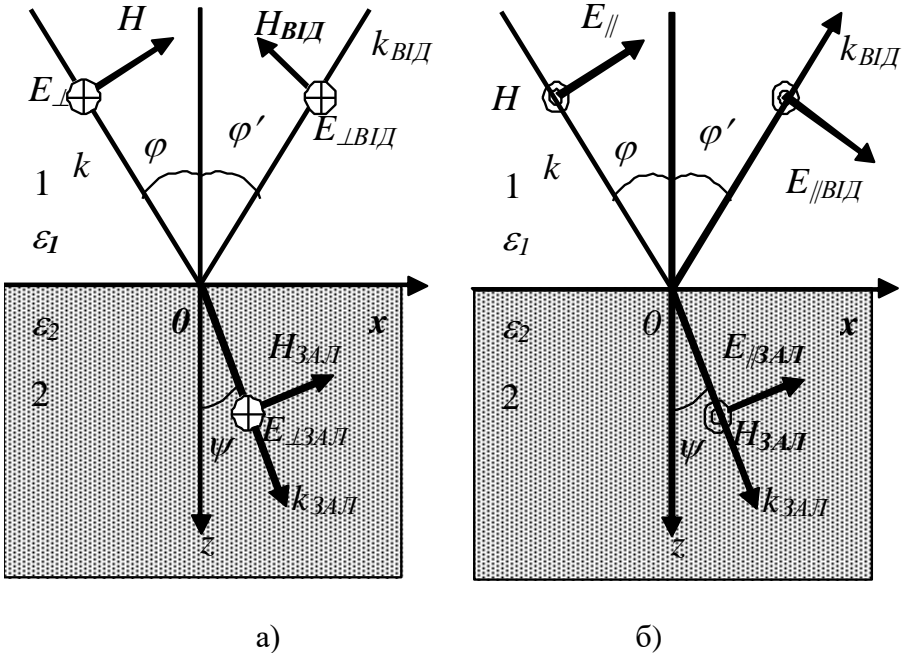


Рис. 3.7. Відбиття і заломлення оптичного випромінювання

Нехай на плоску нерухому границю розділу середовища 1 і середовища 2 падає монохроматична хвиля. З розуміння симетрії випливає, що відбиті і проникаючі в друге середовище хвилі будуть також плоскими і з тією ж частотою ω . Рівність частот випливає з лінійності граничних умов.

Якщо падаюча хвиля однорідна, то відбита хвиля також однорідна. Граничні умови можна записати у вигляді:

$$\frac{\sin^2 \varphi}{c^2} \varepsilon_1 = \frac{\sin^2 \varphi'}{c^2} \varepsilon_1 = \frac{\sin^2 \psi}{c^2} \varepsilon_2.$$

Перша рівність означає, що $\varphi = \varphi'$, тобто ми приходимо до закону відбиття. Для заломленої хвилі маємо ланцюжок рівностей, що збігається з законом заломлення:

$$\frac{\sin \psi}{\sin \varphi} = \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} = \frac{1}{n}.$$

На відміну від геометричних законів амплітуди відбитої і заломленої хвиль залежать від поляризації падаючої хвилі. Тому роздільно розглядають випадки, коли електричний вектор лежить у площині падіння і коли перпендикулярний їй.

Граничні умови для електричного вектора E_{II} , що лежить у площині падіння, приймають вид:

$$\begin{cases} E_{II} \cos \varphi + E_{IIВД} \cos \varphi = E_{IIЗАЛ} \cos \psi \\ n_1 E_{II} - n_1 E_{IIЗАЛ} = n_1 E_{IIЗАЛ} \end{cases},$$

де через E_{II} позначено відповідні амплітуди коливань. Вирішуючи систему рівнянь і використовуючи закони відображення і заломлення, позначимо:

$$\rho_{a,II} = \frac{E_{IIВД}}{E_{II}} = -\frac{\sin 2\varphi - \sin 2\psi}{\sin 2\varphi + \sin 2\psi} = -\frac{\operatorname{tg}(\varphi - \psi)}{\operatorname{tg}(\varphi + \psi)},$$

$$\tau_{a,II} = \frac{E_{IIЗАЛ}}{E_{II}} = \frac{2 \sin \psi \cdot \cos \varphi}{\sin(\varphi + \psi) \cdot \cos(\varphi - \psi)}.$$

Для вектора E_{\perp} , перпендикулярного площині падіння, граничні умови приймають вигляд:

$$\begin{cases} E_{\perp} + E_{\perp\hat{A}\hat{A}} = E_{\perp\hat{C}\hat{A}\hat{E}} \\ n_1 (E_{\perp} - E_{\perp\hat{A}\hat{A}}) \cdot \cos \varphi = n_2 E_{\perp\hat{C}\hat{A}\hat{E}} \cos \psi \end{cases}.$$

Відповідно характеристики відбиття та заломлення \vec{E}_{\perp} запишуться

$$\rho_{a,\perp} = \frac{E_{\perpВД}}{E_{\perp}} = -\frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi + \psi)},$$

$$\tau_{a,\perp} = \frac{E_{\perpЗАЛ}}{E_{\perp}} = \frac{2 \sin \psi \cdot \cos \varphi}{\sin(\varphi + \psi)}.$$

Співвідношення між амплітудами падаючої, відбитої і заломленої хвиль відомі за назвою формул Френеля, у яких ρ_a і τ_a носять назви амплітудних коефіцієнтів відбиття і перепускання відповідно. Величини $\rho = \rho_a^2$ і $\tau = \tau_a^2$ називаються коефіцієнтом відбиття і перепускання відповідно. Незаважко помітити, що

$$\rho = \frac{\Phi_{ВД}}{\Phi} \quad \text{і} \quad \tau = \frac{\Phi_{ЗЛ}}{\Phi},$$

де $\Phi_{ВД}$, $\Phi_{ЗЛ}$ і Φ - відбитий, проникаючий і падаючий на середовище потік випромінювання.

Коефіцієнт відбиття при нормальному падінні ($\varphi=0^0$) називається **відбивною здатністю**:

$$\rho_0 = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2,$$

а коефіцієнт пропускання при $\varphi=0^0$

$$\tau_0 = \frac{4n}{(n+1)^2}$$

називається **поверхневою прозорістю**.

Особливої уваги заслуговують два випадки: коли $\varphi + \psi = \pi/2$ і $\sin\varphi = n$. Незаважко показати, що при куті падіння

$$\varphi_B = \arctg \frac{n_2}{n_1} = \arctg(n)$$

виникає перший випадок. При деякому куті $\varphi = \varphi_B$ коефіцієнт відбиття ρ_{\parallel} дорівнює нулю, а

$$\rho_{\perp} = \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right)^2.$$

Таким чином, при $\varphi = \varphi_B$ відбите світло лінійно поляризоване в площині, перпендикулярній площині падіння. Обернення ρ_{\parallel} у нуль при $\varphi = \varphi_B$ називають законом Брюстера, а кут φ_B - кутом Брюстера [11].

Другий випадок ($\sin\varphi = n$) має місце, коли $n < 1$, тобто коли світло йде з більш заломлюючого середовища в менш заломлююче середовище. Кут φ , відповідний умові $\varphi = \varphi_{КР} = \arcsin(n)$, прийнято називати критичним чи граничним. Як відомо, при $\varphi = \varphi_{КР}$ світ-

лова хвиля не заломлюється, а усе світло цілком відбивається назад у перше середовище, відповідно до чого явище зветься повним внутрішнім відбиттям [20].

Явищем повного внутрішнього відбиття пояснюється поширення світла по оптичному волокну (світловоді). Найпростішим випадком таких світловодів є призми повного внутрішнього відбиття часто використовувані в оптичних приладах для зміни напрямку пучка променів.

Залежно від ступеня шершавості площини розділу двох середовищ відбиття може бути (рис. 3.8) дзеркальним (спрямованим), дифузійним (абсолютно розсіює) і дзеркально-дифузійним (спрямовано розсіює). Дзеркальне відбиття мають гладкі, поліровані поверхні (металів, стекл, кристалів, пластмас тощо), шорсткості і нерівності яких малі в порівнянні з довжиною хвилі світла [12].

Для дифузійного відбиття розподіл потужності по куту φ (індикатриса відбиття) підкоряється закону Ламберта:

$$I_{вд} = I_0 \cos \varphi .$$

До числа матеріалів, що мають дифузійне відбиття, відносяться окис магнію, алебастр тощо. Дифузно відбиваюче тіло з коефіцієнтом $\rho=1$ називається ідеальним розсіювачем [20].

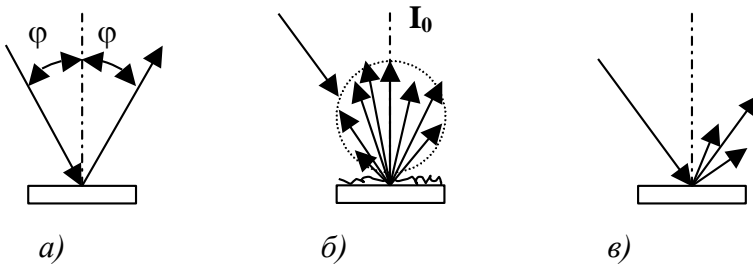


Рис.3.8. Види відбиття

Для характеристики відбивних властивостей різних матеріалів використовують також поняття коефіцієнта яскравості

$$\beta_U = \frac{L}{L_{IP}} ,$$

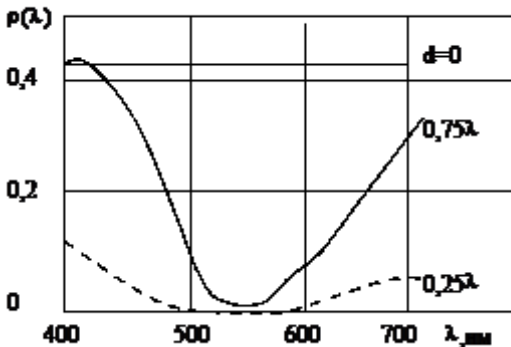
що являє собою відношення яскравості освітленої поверхні до яскравості ідеального розсіювача (ІР), що знаходяться в тих же умовах поглинання.

3.3.2. Просвітління оптики

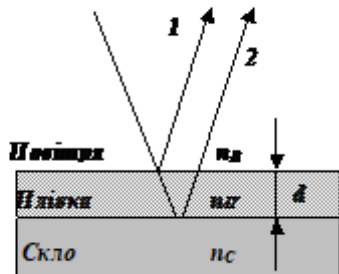
Сучасні оптичні системи оптико-електронних приладів складаються з великої кількості лінз і призм. Наявність багаторазових відбиттів від границі розділу не тільки зменшує яскравість зображення, але і погіршує його якість. Для зменшення втрат на відбиття від границь розділу оптичних середовищ застосовують просвітління оптики [11,12,20]. Зменшення коефіцієнта відбиття досягається нанесенням на оптичну поверхню лінзи чи призми найтоншої плівки з показником заломлення, меншим показника заломлення скла. Вибираючи визначене значення показника заломлення плівки n_{II} , можна досягти рівності коефіцієнтів відбиттів від першої і другої границь плівки при відомих показниках заломлення першого середовища n_B і n_C другого середовища (рис. 3.9 б).

При нормальному падінні світлового потоку на границю розділу умови рівності коефіцієнтів відбиття визначаються за формулою:

$$\frac{n_C - n_{II}}{n_C + n_{II}} = \frac{n_{II} - n_B}{n_{II} + n_B}.$$



а)



б)

Рис.3.9. До пояснення посвітління оптики

За умови

$$\frac{n_C - n_{II}}{n_{II} - n_B} > 0$$

одержимо:

$$n_{II} = \sqrt{n_B n_C} .$$

З огляду на те, що $n_B \approx 1$, співвідношення показників заломлення скла і плівки визначається у вигляді

$$n_{II} = \sqrt{n_C} .$$

Різниця ходу відбитих від границь розділу повинна бути кратною $\lambda/2$, тому що тільки в цьому випадку інтерференція відбитих променів приведе до їх гасіння. Тому оптична довжина шляху S у плівці повинна дорівнювати

$$S = n_{II} b = (2p + 1) \frac{\lambda}{4} ,$$

де b - товщина плівки; p - будь-яке ціле число.

Довжина хвилі, для якої здійснюється просвітління, звичайно вказується в технічних умовах. Товщина плівки визначає вибірковість відбиття в короткохвильовій і довгохвильовій областях спектра (див. рис. 3.9 а). Сучасна технологія нанесення багатошарових покриттів, що просвітлюють, дозволяє збільшити коефіцієнт перепускання багатолінзових об'єктивів до 0.8-0,85 у видимому діапазоні.

3.4. Проходження оптичного випромінювання атмосферою

Світлова хвиля, що поширюється в речовині, послабляється за рахунок поглинання і розсіювання.

Цей вид світлових утрат залежить від типу речовини, його будови і товщини [13].

3.4.1. Поглинання оптичного випромінювання в середовищі

З кількісної точки зору ослаблення характеризується натуральним показником ослаблення μ' , під яким розуміється величина, зворотна відстані, на якій потік випромінювання, що утворює рівнобіжний пучок, послабляється в e разів у результаті спільної дії поглинання і розсіювання в речовині [20]:

$$\mu' = a + r ,$$

де a і r - показники поглинання і розсіювання відповідно.

Припустимо, що на шар середовища, товщиною dl (рис. 3.10), падає світловий потік Φ , який на виході шару зменшується за рахунок ослаблення на величину $d\Phi$:

$$-d\Phi = \mu' \Phi dl .$$

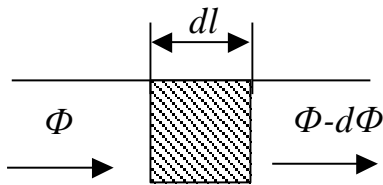


Рис.3.10. До пояснення процесу ослаблення

Вираз являє собою закон Бугера в диференціальній формі. Розділивши змінні і проінтегрувавши, одержимо закон Бугера в інтегральній формі:

$$\Phi_{\tau} = \Phi \cdot \exp(-\mu' l) .$$

З огляду на те, що $\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi}$ являє собою коефіцієнт пропускання

середовища, обумовлений втратами на поглинання і розсіювання, вираз можна записати у вигляді

$$\tau = \exp(-\mu' l) .$$

У світлотехнічній практиці часто показник ослаблення визначається при десятковій підставі:

$$\tau = 10^{-\mu_{10} l} ,$$

де $\mu_{10}=0,434\mu'$ - десятковий показник ослаблення.

Найчастіше для характеристики прозорості середовища використовується поняття оптичної щільності середовища, під якою розуміють десятковий логарифм величини, зворотної коефіцієнта пропускання і вимірюваної в белах:

$$D = \lg \frac{1}{\tau}, [\text{Б}]$$

Якщо світловий потік проходить через m середовищ, то

$$\tau_{\Sigma} = \prod_m \tau_m ; D_{\Sigma} = \sum_m D_m .$$

Взагалі, закон Бугера справедливий для монохроматичного випромінювання, тому що $\mu' = f(\lambda)$. Однак у більшості випадків оптичні середовища можна розглядати як ті, що не вибірково послабляють у заданому діапазоні довжин хвиль.

Поглинання випромінювання

Поглинання, як відомо, може бути описано показником поглинання a і коефіцієнтом поглинання α (для діелектриків), і показником поглинання χ (для сильно поглинаючих середовищ; (наприклад, металів). Коефіцієнт поглинання [27]

$$\alpha = \frac{\Phi_i}{\Phi} = 1 - a^{2ax},$$

де Φ_{II} поглинений світловий потік, а Φ - падаючий на середовище світловий потік, x - товщина поглинаючого шару. Швидкість поширення v плоскої світлової хвилі в сильно поглинаючому середовищі

$$v = \frac{c}{\sqrt{\hat{\varepsilon}}} .$$

Тут $\hat{\varepsilon} = \varepsilon + i \frac{2\sigma}{v}$ - комплексна діелектрична проникність середовища, рівна $\sqrt{\hat{\varepsilon}} = n + in\chi^2$, де σ - електрична провідність середовища.

Фізична природа поглинання світла середовищами, які проводять, полягає в тому, що під дією електричного поля хвилі виникає струм провідності, що викликає джоулеві втрати.

Розсіювання випромінювання

Розрізняють два види розсіювання [12]: розсіювання на флуктуаціях об'ємної густини речовини (молекулярне розсіювання) і розсіювання на зважених частках домішки іншої речовини. Розсіювання спостерігається лише в тих випадках, коли розміри неоднорідностей не є надмірно малими в порівнянні з довжиною хвилі випромінювання.

3.4.2. Перепускання атмосферою потоку випромінювання видимого й інфрачервоного діапазонів

Світловий потік, проходячи крізь атмосферу, піддається як кількісній, так і якісній зміні. Якісна зміна зв'язана зі зміною спектрального складу потоку, а кількісна - з його втратами за рахунок поглинання і розсіювання [27].

Дані два явища обумовлені молекулярною будовою атмосфери і наявністю в ній сторонніх різних часток у вигляді пилу, водяної пари, крапель води тощо, названих аерозолями.

У загальному випадку процес поширення світла в атмосфері описується законом Бугера. Серед обмежень застосування закону Бугера можна назвати такі [11]:

у шарі атмосфери повинні бути відсутні власне й індуковане світіння, нелінійно-оптичні явища, ефекти багаторазового розсіювання;

повинна мати місце монохроматичність світла;

в об'ємі, що розсіює, повинна бути велика кількість часток.

Поглинання оптичного випромінювання атмосферою

Поглинання випромінювання спостерігається при його взаємодії з багатоатомними структурами. Вибірковий характер поглинання випромінювання молекулами атмосферних газів визначається квантомеханічною природою даного процесу [12].

Істотну роль у поглинанні випромінювання грають водяна пара, вуглекислий газ і озон. В області довжин хвиль до 16 мкм є кілька вікон прозорості (рис. 3.11).

Найінтенсивніші смуги поглинання водяних парів відповідають довжинам хвиль: 0,92; 1,13; 1,4; 1,88; 2,7; 3,2; 6, 3 мкм. На

довжинах хвиль $\lambda > 17$ мкм водяна пара не пропускає інфрачервоне випромінювання. Сильне поглинання вуглекислим газом спостерігається на довжинах хвиль 2,05; 2,7; 4,3 мкм і в інтервалі 12,8-17,3 мкм.

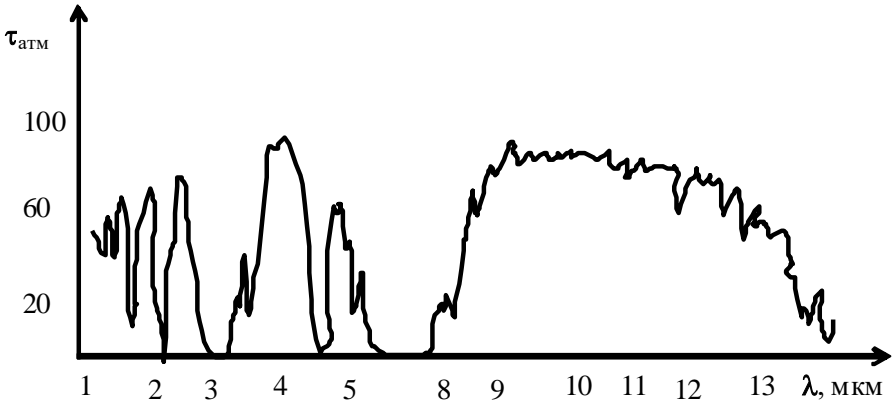


Рис.3.11. Залежність коефіцієнта прозорості атмосфери від довжини хвилі випромінювання

На довжинах хвиль 14 мкм вуглекислий газ не пропускає ІЧ-промені. Озон має дві сильні лінії поглинання: 4,7 мкм і 9,6 мкм. Поглинаюча здатність озону враховується звичайно в післягрозовий період.

Для розрахунку вибіркового поглинання водяними парами усередині вікон прозорості можна використовувати наближену залежність, запропоновану Ельдером і Стронгом [27]:

$$\tau_{II} = t_0 - p_0 \lg(w),$$

де w - приведена товщина водяних парів у міліметрах на 1 км шляху; t_0 і p_0 - постійні (табл. 3.2). Для випадку серпанка на висотах більше 2-3 км застосовується така формула для розрахунку w :

$$w = a_0 10^{-\left(3 + \frac{H}{5}\right) l},$$

де a_0 - абсолютна вологість біля поверхні землі, в г/см³; l - довжина шляху, в м; H - висота польоту, в км.

Розсіювання світла в атмосфері

У сухому чистому повітрі розсіювання випромінювання відбувається на молекулах газів, що входять до складу атмосфери. За законом Релея коефіцієнт розсіювання r дорівнює [27]

$$r = \frac{1}{\lambda^4} \cdot \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3N},$$

де N - концентрація часток (молекул).

Таблиця 3.2

Постійні t_0 і p_0

Постійні	Вікна прозорості, мкм						
	0,72-0,92	0,92-1,2	1,1-1,4	1,4-1,9	1,9-2,7	2,7-4,3	4,3-5,9
$p_{0,\%}$	15,1	16,5	17,1	13,1	13,1	12,5	21,2
$t_{0,\%}$	106,3	106,3	96,3	81,0	72,5	72,3	51,2

Концентрація часток (кількість часток у 1 см^3) залежно від висоти над поверхнею Землі приведена у табл. 3.3.

Коефіцієнт перепускання чистої атмосфери τ_m , обумовлений розсіюванням на молекулах, визначається за законом Бугера з урахуванням закону Релея і табл. 3.2.

Таблиця 3.3

Концентрація часток залежно від висоти

$H, \text{км}$	0	10	20	30	40	50	100
$N, \text{см}^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{18}$	$8,6 \cdot 10^{18}$	$1,9 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{17}$	$8 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$	$6 \cdot 10^{12}$

При наявності в атмосфері часток пилу і вологи характер розсіювання змінюється. Якщо розмір аерозолів не перевищує 1 мкм, то говорять про наявність атмосферного серпанка. Краплі природного туману мають розмір, в основному, 5-10 мкм. Хмари являють собою атмосферні утворення, що складаються з крапель води чи кристалів льоду розміром 5-20 мкм. Концентрація їх трохи більше, ніж у густому тумані.

Розсіювання серпанком на висоті більше 2-3 км визначається наближеною формулою Ельдера-Стронга [12]

$$\tau_p = (0,998)^w.$$

Таким чином, загальний коефіцієнт прозорості чистої вологої атмосфери приблизно може бути розрахований так:

$$\tau_{атм} = \tau_M \tau_{\Pi} \tau_p.$$

Метеорологічна дальність видимості (МДВ)

Коефіцієнтом перепускання атмосфери і показником ослаблення випромінювання зручно користуватися при вивченні теоретичних питань поширення світла в атмосфері. У повсякденній практиці не вимірюють ні коефіцієнти, ні показники ослаблення. Про прозорість атмосфери судять по дальності видимості великих об'єктів.

Метеорологічна дальність видимості S_M являє собою умовне вираження прозорості атмосфери і дорівнює граничній відстані, на якій у денний час на фоні північної частини обр'ю видно чорні предмети досить великих розмірів (більше 15'x15'). Зв'язок між МДВ і коефіцієнтом перепускання виражається у вигляді світлоповітряної формули [11,20]

$$L_{атм} = L_H (1 - \tau_{атм}) = L_H (1 - e^{-\mu' l}),$$

де $L_{атм}$ - яскравість шару атмосфери між спостерігачем і об'єктом; L_H - яскравість неба в обр'ї.

Якщо об'єкт, що спостерігається, яскравість якого $L_0=0$, розглядається на фоні обр'ю, то зі збільшенням відстані між спостерігачем і об'єктом яскравість шару атмосфери росте, а потім настане такий момент, коли відношення $\frac{L_H - L_{атм}}{L_H}$ досягне

граничного значення рівного 0,02, при якому спостерігач не в змозі розрізнити об'єкт. Ця гранична відстань і є метеорологічна дальність видимості S_M .

Після перетворення запишемо

$$0,02 = e^{-\mu' S_M}.$$

Звідси

$$S_M = \frac{3.9}{\mu'} = \frac{1.7}{\mu_{10}} ;$$

$$\tau_{atm} = 10^{-\frac{1.7}{S_M}} .$$

Відповідно до міжнародної шкали видимості дальність видимості при рішенні практичних задач оцінюється за десятибальною шкалою, кожному балу якої відповідає визначена МДВ.

3.4.3. Вплив турбулентності атмосфери на поширення хвиль

Земна атмосфера, якою обмежується чіткість картини неба, є прикладом протяжного випадкового неоднорідного середовища. У даному випадку виключається з розгляду вплив на оптичні явища пилу й аерозолів, що вимагає вивчення явищ багаторазового розсіювання і обмежується також увага оптичними властивостями у відповідному спектральному «вікні» атмосфери (такому як видима область спектра), у якому атмосферне поглинання дуже несуттєве.

Питанню про поширення оптичного сигналу в турбулентному середовищі присвячена велика кількість літератури. Однак, без сумніву, найбільший вплив на розвиток цього кола питань зробила важлива робота Татарського, дві книги якого [33,34] послужили фундаментом для більшості наступних робіт. Скористаємося деякими позначеннями, введеними в цих роботах.

На рис. 3.12 показана загальна модель розповсюдження відбитого об'єктом некогерентного випромінювання [36].

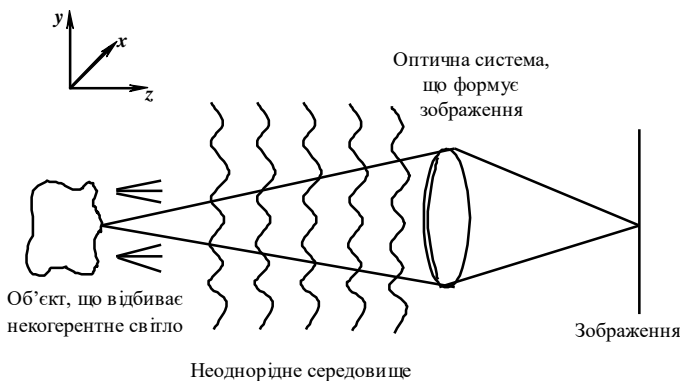


Рис. 3.12. Геометрія формування зображення

Простір між елементом, що формує зображення, і об'єктом заповнено протяжним хаотично неоднорідним середовищем (земною атмосферою). Зображення, формоване такою системою, буде спотворюватися через наявність неоднорідного середовища і потрібно вміти розраховувати такі викривлення [32].

Показник заломлення земної атмосфери змінюється в просторі, часі й залежить від довжини хвилі. Для зручності представимо ці залежності у вигляді

$$n(r, t, \lambda) = n_0(r, t, \lambda) + n_1(r, t, \lambda) \quad (3.12)$$

де n_0 - регулярна (невипадкова) частина величини n , а n_1 випадкові флуктуації величини n відносно середнього значення $\bar{n} = n_0 \approx 1$.

Детерміновані зміни величини n , загалом кажучи, є дуже плавними й макроскопічними в просторовому вимірі. Наприклад, n_0 містить залежність n від висоти над поверхнею Землі. Завдяки порівняно більшим часовим масштабам, пов'язаним з n_0 , часову залежність цього члена можна не враховувати.

Випадкові флуктуації n_1 виникають через наявність турбулентності в атмосфері. Турбулентні вихрі в повітрі мають масштаб, що змінюється від десятків метрів і більше до декількох міліметрів. Залежність цих випадкових флуктуацій від довжини хвилі, загалом кажучи, можна ігнорувати, що дозволяє нам записати (3.12) у вигляді

$$n(r, t, \lambda) = n_0(r, \lambda) + n_1(r, t).$$

Помітимо, що типові значення n_1 на кілька порядків величини менше одиниці [35].

Час, витрачений світлом на проходження через атмосферу - лише мала частина «часу флуктуації» випадкової складової показника заломлення n_1 . Із цієї причини залежністю величини n_1 від часу часто зневажають, розглядаючи тільки просторові властивості. Якщо в тому або іншому завданні становить інтерес і часова залежність, то вона вводиться на основі гіпотези «замороженої турбулентності» (названою також гіпотезою Тейлора), відповідно до якої дана реалізація випадкової структури n_1 «дрейфує» через вимірювальну апертуру з постійною швидкістю (обумовленою локальними вітровими умовами), але без яких-небудь інших змін.

Однією з найважливіших статистичних характеристик випадкового процесу $n_1(r)$ є просторова автокореляційна функція

$$\Gamma_n(r_1, r_2) = E[n_1(r_1)n_1(r_2)]$$

Якщо n_1 - просторово-стаціонарний процес у тривимірному просторі, то говориться, що він статистично *однорідний* і його автокореляційна функція приймає більш простий вигляд

$$\Gamma_n(r_1, r_2) = E[n_1(r_1)n_1(r_1 - r)]$$

де $r = r_1 - r_2 = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$.

Спектральна щільність потужності випадкового процесу n_1 визначається як тривимірний Фур'є - образ величини $\Gamma_n(r)$ і в позначеннях записується таким чином:

$$\Phi_n(\chi) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{+\infty} \int \int \Gamma_n(r) e^{j\chi r} d^3 r$$

де $\chi = (\chi_x, \chi_y, \chi_z)$ є так званий хвильовий вектор, який можна розглядати як вектор просторової частоти, кожний компонент якого вимірюється в одиницях радіан на метр.

Аналогічно можна виразити автокореляційну функцію через спектральну щільність потужності:

$$\Gamma_n(r) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \int \Phi_n(\chi) e^{-j\chi r} d^3 \chi \quad (3.13)$$

Після того, як введено позначення, можна перейти безпосередньо до оптичних властивостей турбулентної атмосфери.

Розглянемо атмосферну модель.

Показник заломлення повітря на оптичних частотах визначається виразами [32]:

$$n = 1 + 77,6 \left(1 + 7,52 \cdot 10^{-3} \lambda^{-2} \right) \frac{P}{T} \cdot 10^{-6},$$

де λ - довжина хвилі світла в мікрометрах; P - атмосферний тиск у мілібарах; T - температура в Кельвінах.

Залежність n від тиску порівняно слабка і її можна не враховувати. Тоді температурні флуктуації виступають як основна причина флуктуації величини n . При $\lambda = 0,5$ зміна dn показника заломлення, викликана підвищенням температури на dT , дорівнює

$$dn = -\frac{79P}{T^2} \cdot 10^{-6} dT,$$

При поширенні світла на рівні моря похідна $\frac{dn}{dT}$ є величина порядку 10^{-6} .

Випадкові флуктуації n_1 показника заломлення викликаються переважно випадковою мікроструктурою просторового розподілу температури. Походження цієї мікроструктури пов'язане з надзвичайно широкомасштабними температурними неоднорідностями, обумовленими різним ступенем нагрівання окремих ділянок земної поверхні Сонцем. Ці великомасштабні температурні неоднорідності у свою чергу викликають появу великомасштабних неоднорідностей показника заломлення, які поступово руйнуються турбулентним вітровим потоком і конвекцією, що зменшують масштаб неоднорідностей.

Неоднорідності показника заломлення прийнято називати турбулентними «вихрами», які можна розглядати як якісь «паке-ти» повітря, кожний зі своїм характерним показником заломлення. Спектральна щільність потужності $\Phi_n(\chi)$ однорід-

ної турбулентності може розглядатися як міра відносного числа вихрів з розмірами $L_x = \frac{2\pi}{\chi_x}$, $L_y = \frac{2\pi}{\chi_y}$ і $L_z = \frac{2\pi}{\chi_z}$. У випадку ізотропної турбулентності величина $\Phi_n(\chi)$ є функцією тільки хвильового числа χ , що може розглядатися як величина, пов'язана з розміром вихру L співвідношенням $L = \frac{2\pi}{\chi}$.

Відповідно до класичної теорії турбулентності Колмогорова, спектр потужності $\Phi_n(\chi)$ розпадається на три великі області. При дуже малих χ (дуже великі масштаби) ми маємо область, у якій спочатку виникає більшість неоднорідностей. Математична форма $\Phi_n(\chi)$ в цій області не описується теорією, тому що вона залежить від великомасштабних географічних і метеорологічних умов. Крім того, малоймовірно, щоб турбулентність була ізотропною або однорідною в таких масштабах.

При значеннях χ , що перевищують деяке критичне значення χ_0 , форма функції $\Phi_n(\chi)$ визначається фізичними законами, які описують розпад більших турбулентних вихрів на більш дрібні. Масштаб $L_0 = \frac{2\pi}{\chi_0}$ називається зовнішнім масштабом турбулентності. Поблизу земної поверхні ми маємо

$$L_0 \approx \frac{h}{2},$$

де h - висота над поверхнею.

Типові значення L_0 , що приводяться в літературі, змінюються від 1 до 100 м залежно від атмосферних умов і геометрії розглянутого експерименту.

При χ більших χ_0 , ми вступаємо в інерційну підобласть спектра, де форма функції $\Phi_n(\chi)$ може бути передвіщена на основі добре встановлених фізичних законів, що описують турбулентний рух. Відповідно до роботи Колмогорова, форма функції Φ_n інерційній підобласті подається виразом

$$\Phi_n(\chi) = 0.033 C_n^2 \chi^{-11/3}, \quad (3.15)$$

де C_n^2 - так звана структурна постійна флуктуації показника заломлення, що служить мірою інтенсивності флуктуації.

Коли χ досягає іншого критичного значення χ_m , форма функції Φ_n знову змінюється. Турбулентні вихрі, менші певного масштабу, розсіюють свою енергію в результаті дії в'язких сил, що приводить до швидкого зменшення $\Phi_n(\chi)$ при $\chi > \chi_m$. Масштаб $l_0 \approx 2\pi/\chi_m$ називається внутрішнім масштабом турбулентності. Типове значення масштабу l_0 поблизу поверхні Землі - кілька міліметрів. Татарський урахував швидкий спад Φ_n при $\chi > \chi_m$ введенням модельної функції

$$\Phi_n(\chi) = 0.033 C_n^2 \chi^{-\frac{11}{3}} \exp\left(-\frac{\chi^2}{\chi_m^2}\right). \quad (3.16)$$

Цей вираз можна вважати задовільним наближенням, якщо величина χ_m обрана рівною $5,92/l_0$ й $\chi > \chi_0$.

Обидва спектри (3.15) і (3.16) мають точки на початку координат, які не інтегруються. Але насправді, оскільки кількість повітря в земній атмосфері обмежена, спектр не може стати довільно великим при $\chi \rightarrow 0$. Щоб усунути цей недолік моделі, часто приймають форму так званого спектра Кармана. У цьому випадку для спектра застосовують наближену формулу

$$\Phi_n(\chi) \approx \frac{0.033 C_n^2}{(\chi^2 + \chi_0^2)} \exp\left(-\frac{\chi^2}{\chi_m^2}\right). \quad (3.17)$$

Підкреслимо, однак, що форма спектра в області дуже малих значень хвильових чисел невідома й формула (3.17) - це лише штучний спосіб наближення. Крім того, лише в деяких експериментах був істотним вплив вихрів, більших за зовнішній масштаб, так що в дійсності немає необхідності знати вид спектра в цій області.

На рис. 3.13 представлені графіки функцій $\Phi_n(\chi)$, заданих формулами (3.16) і (3.17), причому зазначені хвильові числа χ_0 й χ_m , в інтервалі між якими виконується закон $\chi^{-11/3}$.

При дослідженні впливу атмосферної турбулентності на системи, що формують зображення, видно, що на характеристики такої системи впливає структурна функція флуктуації показника заломлення. По визначенню ця структурна функція дається виразом

$$D_n(r_1, r_2) = E\{[n_1(r_1) - n_1(r_2)]^2\}. \quad (3.18)$$

Наведемо співвідношення між цією структурною функцією й спектральною щільністю потужності Φ_n для флуктуації показника заломлення [36].

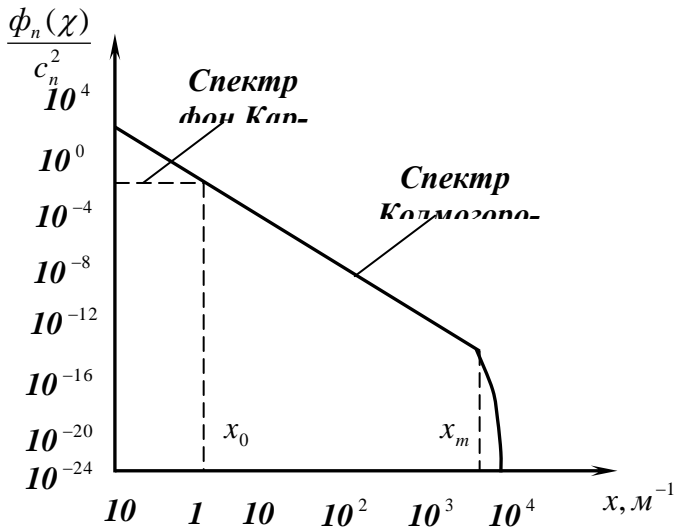


Рис. 3.13. Спектральна щільність потужності флуктуації показника переломлення

Якщо турбулентність ізотропна, то

$$D_n(r) = 8\pi \int_0^\infty \Phi_n(\chi) \chi^2 \left(1 - \frac{\sin(\chi r)}{\chi r}\right) d\chi. \quad (3.19)$$

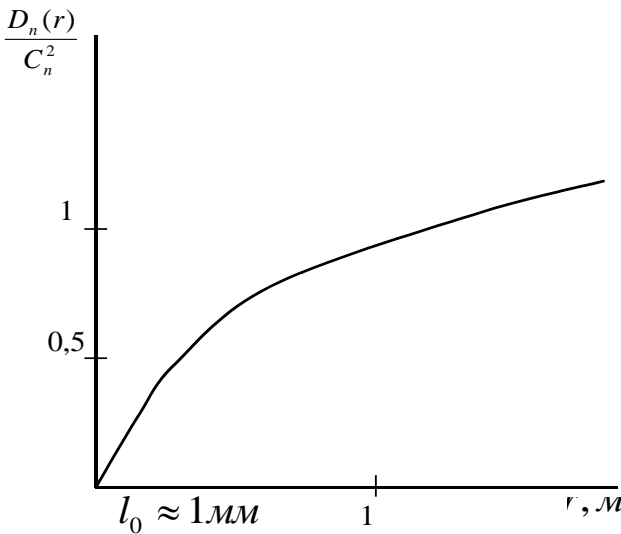
В окремому випадку, що представляє інтерес, спектральна щільність потужності дорівнює $0.033 C_n^2 \chi^{\frac{11}{3}}$. Для структурної функції, що відповідає колмогорівському спектру (3.15), вираз

$$D_n(r) = C_n^2 r^{\frac{2}{3}}. \quad (3.20)$$

Відмітимо, що структурна постійна C_n^2 залежить як від місцевих атмосферних умов, так і від висоти над поверхнею Землі. Типові її значення поблизу поверхні Землі лежать у межах від $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ при сильній турбулентності до $10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$ при слабкій, за «середню» часто беруть значення $10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$.

На закінчення помітимо, що формула (3.20) для структурної функції застосована тільки при $l_0 < r < L_0$, оскільки вираз для спектральної щільності, узятий при виводі цієї формули, придатний тільки при $\chi_0 < r < \chi_m$.

На рис. 3.14 представлений графік структурної функції $D_n(r)$, що описується виразом (3.20).



3.5. Оптичні системи, елементи і деталі

Оптичною системою називають сукупність оптичних деталей, призначену для передачі, прийому й обробки оптичних сигналів.

Рис. 3.14. Структурна функція показника заломлення у випадку колмогорівського спектра турбулентності

Залежно від призначення розрізняють такі види оптичних систем: фотографічний об'єктив, проєкційний об'єктив, телевізійний об'єктив, мікроскоп, телескоп, афокальний об'єктив. Фотографічний і телевізійний об'єктив і різні оптичні деталі знаходять широке застосування в комплексах оптико-електронного обладнання космічних апаратів.

3.5.1. Ідеальна оптична система

Послідовно розташовані оптичні деталі, що мають загальну вісь симетрії, утворюють центровану оптичну систему. Вісь симетрії називається оптичною віссю. Оптична вісь є нормаллю до оптичних поверхонь, тому вона не заломлюється.

Ідеальною оптичною системою називають оптичну систему, що відображає кожну точку предмета точкою зі збереженням заданого масштабу зображення. Ідеальна оптична система не порушує гомоцентричності пучка і може бути здійснена при виконанні такої умови: кожній точці і прямій простору предметів (рис. 3.15) повинна відповідати точка і пряма простору зображень [20].

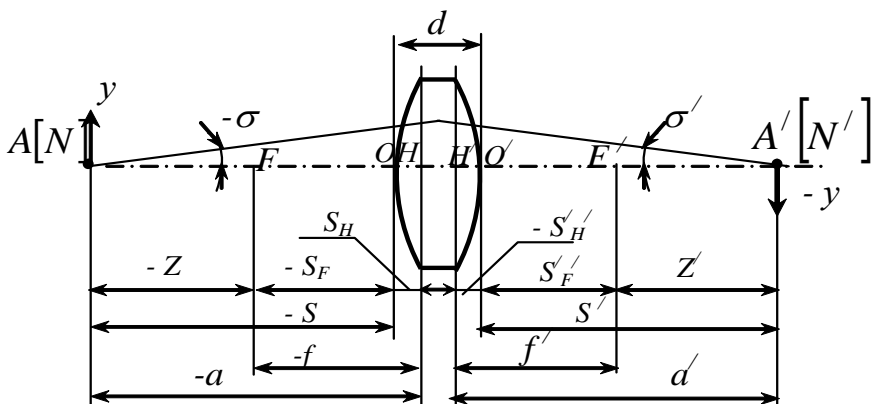


Рис.3.15. До пояснення ідеальної оптичної системи

Правила знаків і позначень

При розрахунках оптичних систем, а також при виводі формул і рівнянь геометричної оптики, зазвичай користуються визначеними правилами знаків і позначень [11]:

1. Усі кути і відрізки до заломлення позначаються малими буквами грецького чи латинського алфавітів, а після заломлення - тими ж буквами зі штрихами.

2. Відрізки прямих вважаються позитивними, якщо вони вимірюються за напрямком поширення світла, і негативними, якщо - проти напрямку світла. Позитивним прийнято вважати напрямок, коли світло поширюється ліворуч – праворуч.

3. Відрізки, перпендикулярні оптичній осі, вважаються позитивними, якщо вони спрямовані нагору, і негативними, якщо вниз.

4. Радіус сферичної поверхні r вважається позитивним, якщо центр її кривизни C розташований праворуч, і негативним - у протилежному випадку.

5. Кути будуть позитивними при відліку по годинниковій стрілці і негативними - проти годинникової стрілки.

Основні площини і параметри оптичної системи

Площини, що містять оптичну вісь системи, називаються меридіанальними. Площини, що не проходять через оптичну

вісь, відносяться до позамеридіанальних площин. Якщо світла точка знаходиться поза оптичною віссю, то існує тільки одна меридіанальна площина.

Площини, які містять вісь симетрії елементарного гомоцентричного пучка (головний промінь), роздвоюють пучок сагітально (поділяють його уздовж осі навпіл) і тому називаються сагітальними. Одна з них, а саме перпендикулярна меридіанальній, приймається в розрахунках оптичних систем як сагітальна.

Лінійним збільшенням β оптичної системи називається відношення лінійного розміру Y' параксіального зображення до розміру Y предмета, розташованих у сполучених площинах, перпендикулярних оптичній осі $\beta = Y'/Y$.

Передня головна площина - площина в просторі предметів, що сполучена із площиною в просторі зображень, яка називана задньою головною площиною і для якої лінійне збільшення дорівнює $+1$.

Точки перетину головних площин з оптичною віссю називаються передньою головною точкою H і задньою головною точкою H' .

Передній фокус F - точка на оптичній осі в просторі предметів, яка сполучена з нескінченно віддаленою точкою, розташованою на оптичній осі в просторі зображень.

Задній фокус F' - точка на оптичній осі в просторі зображень, яка сполучена з нескінченно віддаленою точкою, розташованою на оптичній осі в просторі предметів.

Відстань f від передньої головної точки до переднього фокуса називається передньою фокусною відстанню, а відстань f' від задньої головної точки до заднього фокуса - задньою фокусною відстанню.

Передній (задній) фокальний відрізок $S_F(S'_F)$ дорівнює відстані від вершини передньої (задньої) поверхні до переднього (заднього) фокуса.

Площина, що проходить через передній (задній) фокус і перпендикулярна оптичній осі, називається передньою (задньою) фокальною площиною.

Кутове збільшення γ - збільшення в сполучених точках на оптичній осі, обумовлене відношенням кутів між параксіальними променями й оптичною віссю в просторі зображень і предметів:

$$\gamma = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\sigma'}{\sigma}.$$

Точка $N(N')$ на оптичній осі в просторі предметів (зображень), для якої кутове збільшення дорівнює $+1$, називається передньою (задньою) вузловою точкою.

Видиме збільшення Γ - відношення тангенса кута, під яким спостерігається параксіальне зображення, до тангенса кута, під яким спостерігається об'єкт неозбровеним оком.

Фокуси, фокусні відстані, фокальні площини, головні площини і головні точки відносяться до кардинальних елементів оптичної системи [20].

3.5.2. Оптичні елементи і деталі оптичних систем

У даний час в оптико-електронній апаратурі використовуються такі оптичні елементи і деталі: лінзи, призми, плоскопаралельні пластини, оптичні клини, світлофільтри.

У оптичних приладах знаходять широке застосування різні оптичні елементи. Вони скорочують габарити довгофокусних камер шляхом зміни ходу променів; служать робочою площиною для вирівнювання фотоплівки; служать оптичними клинами, захисними стеклами тощо. Найчастіше для цих цілей використовуються плоскі дзеркала, призми, плоскопаралельні пластинки, скляні клини, лінзи тощо [20].

Лінзи. Найчастіше використовуються лінзи, обмежені двома сферичними поверхнями [11]. При відсутності кругової симетрії хоча б однієї з поверхонь гомоцентричність пучка буде забезпечуватися тільки в одній з меридіанальних площин.

Оптична сила лінзи являє собою величину, зворотну фокусній відстані:

$$\Phi = \frac{1}{f'}, \text{ [дптр]}.$$

Одиницею оптичної сили є діоптрія (дптр), що дорівнює оптичній силі лінзи з $f' = 1$ м, яка знаходиться в повітрі.

По розташуванню оптичних поверхонь усі лінзи можна розділити на три групи;

1) лінзи, що мають різні за знаком радіуси кривизни поверхонь: двоопуклі і двоввігнуті (рис. 3.16, *а, б*);

2) лінзи, у яких одна з поверхонь плоска: опукло-плоскі і плоско-опуклі, увігнуто-плоскі і плоско-увігнуті (рис. 3.16, *в-е*);

3) лінзи, що мають однакові за знаком радіуси кривизни: опукло-увігнуті й увігнуті-опуклі; якщо товщина лінзи по осі менше, ніж по краях, то такі лінзи називають менісками (рис. 3.16, *ж-к*).

За формою оптичних поверхонь лінзи бувають сферичні й несферичні (асферичні).

На рис. 3.16, *в* показана опукло-плоска лінза, у якої $r_1 > 0$ і $r_2 = \infty$. Положення (величина) кардинальних елементів обчислюється за формулами:

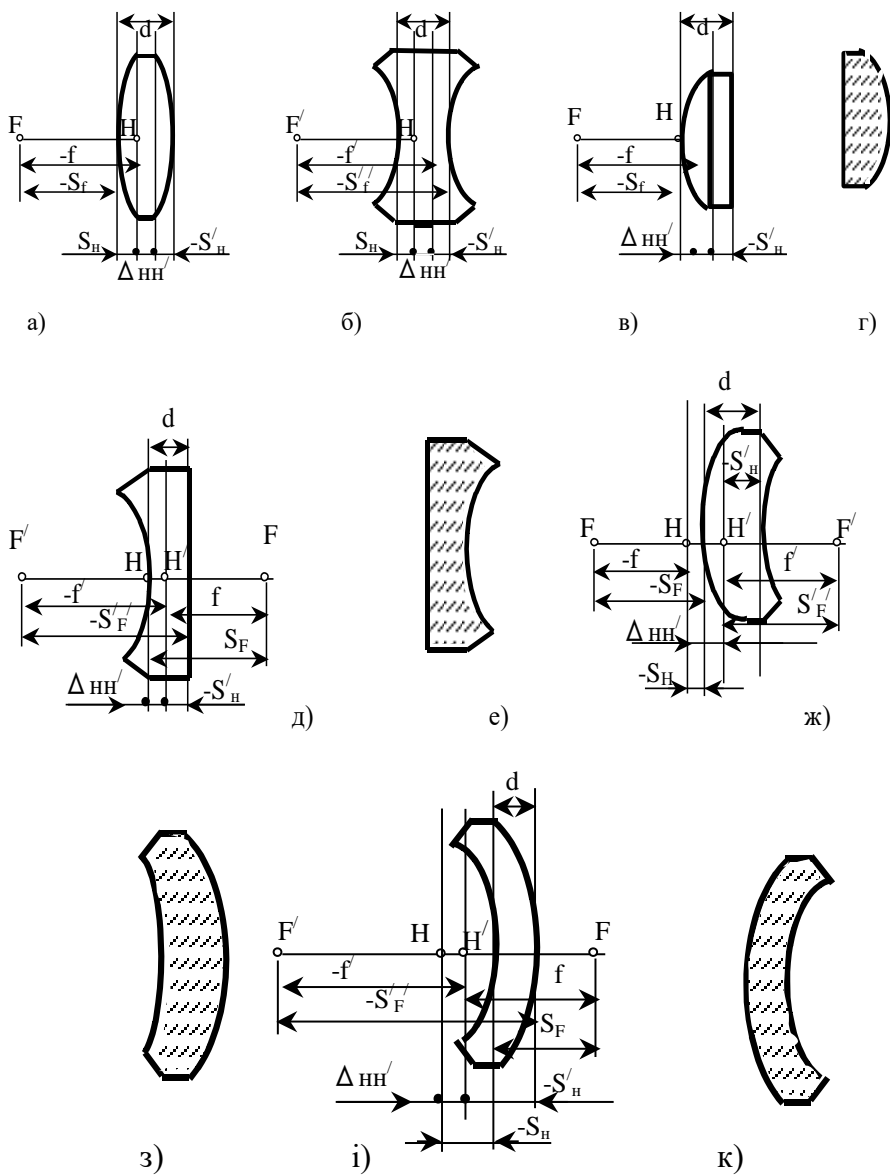


Рис. 3.16. Класифікація лінз

$$f' = -f = \frac{r_1}{n-1}; \quad S'_{F'} = \frac{r_2}{n-1} - \frac{d}{n}; \quad S_F = f;$$

$$S'_{H'} = -\frac{d}{n}; S_H = 0; \Delta HH' = \frac{n-1}{n}d.$$

Фокусні відстані не залежать від товщини лінзи, а передня головна площина торкається опуклої заломлюючої поверхні.

За цими формулами роблять розрахунок для увігнуто-пласкої лінзи (див. рис. 3.16, *д*). Для плоско-опуклої і плоско-увігнутої лінз (див. рис. 3.16, *з*, *е*) розрахункові формули аналогічні:

$$f' = -f = \frac{r_2}{n-1}; S'_{F'} = f'; S_F = \frac{r_2}{n-1} + \frac{d}{n};$$

$$S_H = \frac{d}{n}; S'_{H'} = 0; \Delta HH' = \frac{n-1}{n}d.$$

Для лінзи з концентричними сферичними поверхнями (див. рис. 3.16, *б*) відстань $\Delta HH' = 0$, а фокусна відстань:

$$f' = \left[\frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]^{-1},$$

до яких відносяться увігнуто-опуклий і опукло-увігнутий меніски, а також двоувігнута лінза (див. рис. 3.16, *б*, *і*, *к*).

Для забезпечення надійного кріплення лінзи між її діаметром D_L , товщиною d по осі і товщиною t по краю повинні бути витримані такі співвідношення:

$$\text{для позитивних лінз: } 4d + 10t \geq D_L; t \geq 0.05D_L,$$

$$\text{для негативних } 12d + 3t \geq D_L; d \geq 0.05D_L.$$

Призми. За кількістю граней, що відбивають, призми поділяються на призми з однією, двома чи трьома гранями, і складні призми, що складаються з декількох призм.

Прямокутна призма (рис. 3.17, *а*) з однією гранню, що відбиває, дає симетричне дзеркальне зображення; при повороті навколо ребра при вершині на кут ψ зображення повернеться на кут 2ψ [12].

Довжина ходу променя в такій призмі дорівнює $l = kmn = d$. Вхідні промені йдуть перпендикулярно катету.

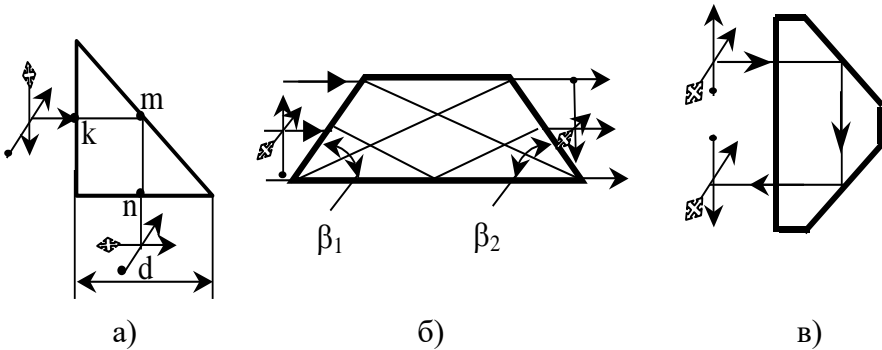


Рис. 3.17. Призми

Призма Дове (див. рис. 3.17, б) являє собою прямокутну призму зі зрізаним прямим кутом, а вхідні промені йдуть паралельно гіпотенузі головного перетину. Вона дає дзеркальне зображення і ставиться тільки в паралельних променях. Довжина ходу променя в призмі дорівнює $l = 3,3h$. Виходячи з рівності

$$\beta_1 = \beta_2 = 90 - \beta / 2 ,$$

де β - кут відхилення вихідного променя, видно, що варіюючи β_1 і β_2 , можна одержати різні β . Звичайно використовується призма з $\beta = 45^\circ$ чи $\beta = 60^\circ$.

Якщо в прямокутній призмі взяти за вхідну грань гіпотенузу (див. рис. 3.17, в), то така призма буде відхиляти промінь на 180° незалежно від кута падіння і давати повне обертання зображення.

Широке застосування у фотограмметричних приладах знаходить пентапризма. Вона відхиляє оптичну вісь на кут $\psi=90$, що не залежить від кута падіння променів на вхідну грань (рис. 3.18, а) [12].

Для зсуву променів паралельно самим собі застосовують призму-ромб. Призма-ромб (рис. 3.18, б), як і пентапризма, дає пряме зображення предмета.

Призма-куб (рис. 3.19) складається з двох прямокутних призм, склеєних гіпотенузними гранями, одна з яких покрита

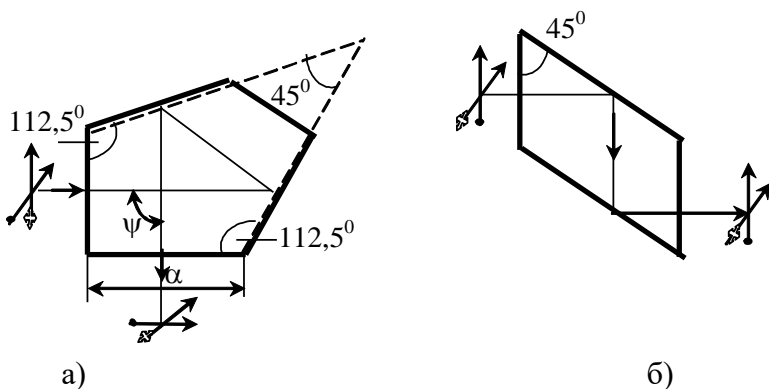


Рис.3.18. Пентапризма та призма-ромб

шаром, що відбиває. Призма дає зображення, не змінюючи напрямку ходу променів.

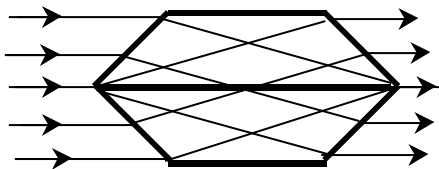


Рис. 3.19. Призма-куб

При обертанні призми навколо осі, перпендикулярної головному перетину, різні точки простору попадають на оптичну вісь нерухомої оптичної системи, що дозволить спостерігати за великим простором при нерухомій осі оптичної системи. Зі складних призм, крім призми-куба, в оптичних приладах найчастіше використовуються призма Аббе, призма Пехана, черевична призма, призма Порро тощо.

Плоскопаралельні пластинки. Плоскопаралельні пластинки використовуються як захисні стекла, світлофільтри, відтінювачі та скло, що вирівнює фотоплівку. Скло, що вирівнює фотоплівку, викликає зсув площини зображення і зниження освітленості. Зсув площини зображення показаний на рис. 3.20. Для кутів па-

діння променів $w' < 15^\circ$ розфокусування визначається як

$$\Delta f' = d \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \sigma_1'}{\operatorname{tg} \sigma'} \right),$$

а для $w' > 15^\circ$ дана величина

$$\Delta f' = d \left(1 - \frac{1}{n_c} \right).$$

Для пластинки $d = 5$ мм, $n = 1,5$; для кутів $w = 45^\circ$, величина $\Delta f' = 2,33$ мм, а для $w = 15^\circ$ величина $\Delta f' = 1,5$ мм. Внесену пластинкою нерізкість зображення можна зменшити для центра поля, змінивши фокусування об'єктива на величину $\Delta f_2'$. Розфокусування на краю поля зображення $\delta f' = \Delta f_1' - \Delta f_2'$ не компенсується і його вплив виключається шляхом включення плоскопаралельної пластинки в розрахунок об'єктива [16].

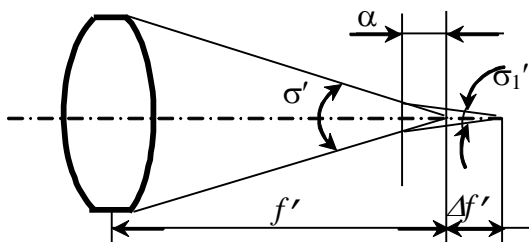


Рис.3. 20. Зсув площини зображення

Величина поперечного зсуву зображення за рахунок пластинки дорівнює

$$\delta_{w'} = d \left(\frac{\operatorname{tg} \sigma'}{n_c} - \operatorname{tg} \sigma_1' \right).$$

Для тих же умов : $\delta_{15^\circ} = 0,07$ мм; $\delta_{45^\circ} = 0,21$ мм.

Пластини високої точності, наприклад ті, які розміщуються перед довгофокусними об'єктивами, повинні мати товщину, рівну приблизно одній десятій діаметру. Втрати світлової енергії в такій пластинці незначні і практично їх не враховують. Мате-

ріалом для виготовлення пластин підвищеної і середньої точності служить крон, легкий крон, ситал чи кварц.

Дзеркала. Залежно від форми поверхні дзеркала бувають плоскими, сферичними й асферичними [20].

Плоске дзеркало відхиляє оптичну вісь системи й обертає зображення. У точних дзеркалах покриття, що відбиває, наноситься на зовнішню площину пластини (рис. 3.21). Цим виключається поява подвоєння зображення й асиметрії в структурі пучка. Для покриттів, що відбивають, які наносяться на скло, використовують срібло, алюміній, хром, родій тощо. Шар срібла нанесений на внутрішню поверхню пластини покривається шаром міді і лаку. Для напівпрозорих дзеркал застосовується світлоподільне покриття сріблом із захисним шаром.

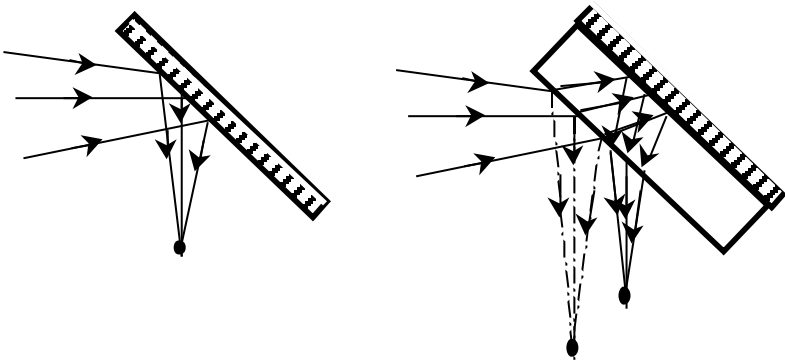


Рис.3.21. Дзеркала

Дія сферичних дзеркал еквівалентна дії лінз. Закон відбиття може бути отриманий із закону заломлення, якщо у виразі $n \cdot \sin \varepsilon = n' \cdot \sin \varepsilon'$ замість показника заломлення n' підставити показник заломлення першого середовища зі зворотним знаком $-n$. Коли дзеркало і предмет знаходяться у повітрі, інваріант Аббе приймає вид:

$$\frac{1}{r} - \frac{1}{S} = -\frac{1}{r} + \frac{1}{S'} ; \quad \frac{1}{S'} + \frac{1}{S} = \frac{2}{r}$$

при

$$S = \infty; S' = f',$$

тоді

$$\varphi' = \frac{1}{f'} = \frac{2}{r}; \quad f' = \frac{r}{2}.$$

Відмінними рисами сферичних і асферичних дзеркал є: малі втрати світла, відсутність хроматичної аберації, малі габарити і маса, компактність дзеркальної системи. Матеріалом для виготовлення сферичної й асферичної поверхонь основи дзеркала служить крон, кварц і ситал.

Оптичні клини. Якщо заломлюючий кут Θ призми малий ($\Theta < 6^\circ$), то така призма називається клином (рис. 3.22). Кут заломлення на першій грані визначається з формули [11]

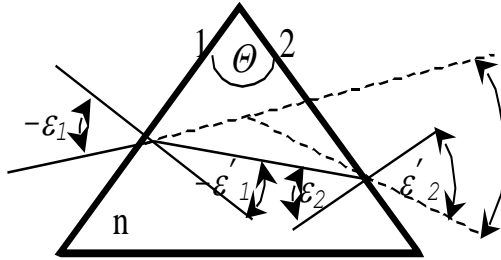


Рис.3.22. Оптичний клин

$$\sin \varepsilon_1' = \frac{\sin \varepsilon_1}{n}.$$

Величина кута відхилення дорівнює

$$w = \Theta \left(n \frac{\cos \varepsilon_1'}{\cos \varepsilon_1} - 1 \right).$$

Для малих кутів падіння, а, отже, і кутів заломлення, кут відхилення променя клином дорівнює

$$w = \Theta(n - 1).$$

Оптичні клини використовуються в різних компенсаторах зсуву і системах виміру малих кутових чи лінійних переміщень.

Світлофільтри. Оптична деталь, яка змінює спектральний склад або величину інтегрального минаючого крізь неї оптичного випромінювання, називається світлофільтром [12].

За призначенням розрізняють світлофільтри знімальні (застосовувані у фото- і кінозніманні), корегуючі (для кольорового фотодруку), лабораторні (для ліхтарів і світлофільтрів різних приладів).

За характером перепускання випромінювання існують такі світлофільтри:

1. монохроматичні - зі смугою перепускання декілька сотих часток мікрметра;
2. компенсаційні – які мають широку зону перепускання і сильно поглинають фіолетові і сині промені (де фотоматеріали мають підвищену чутливість);
3. контрастуючі - які відрізняються від компенсаційних більш різкою границею перепускання світла, починаючи з 0,5 мкм;
4. селективні - які мають у порівнянні з монохроматичними більш широку смугу перепускання;
5. субтрактивні (виділяючі) - які поглинають цілком яку-небудь ділянку спектра;
6. нейтрально-сірі - які рівномірно послабляють і не змінюють спектральний склад випромінювання.

За принципом дії світлофільтри поділяються на абсорбційні, інтерференційні, що розсіюють, і поляризаційні.

До основних параметрів і характеристик світлофільтрів відносяться [12]:

мінімальна оптична щільність $D_{\text{мін}}$;

спектральне перепускання, виражене у вигляді оптичної щільності

$$D_{\text{сф}}(\lambda) = \lg \frac{1}{\tau_{\text{сф}}(\lambda)} = \lg \frac{\Phi_{\text{ВХ}}(\lambda)}{\Phi_{\text{ВИХ}}(\lambda)},$$

де $\Phi_{\text{ВХ}}(\lambda)$ і $\Phi_{\text{ВИХ}}(\lambda)$ - світловий потік до і після світлофільтра відповідно;

смуга перепускання (поглинання) - $\Delta\lambda$, мкм;
кратність, обумовлена співвідношенням

$$q_{CF} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{BX}(\lambda) \cdot S_{PRM}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{BX}(\lambda) \cdot \tau_{CF}(\lambda) \cdot S_{PRM}(\lambda) d\lambda},$$

де $S_{PRM}(\lambda)$ - спектральна чутливість приймача, використовуваного з даним світлофільтром.

Кратність світлофільтра показує, в скільки разів при установці світлофільтра необхідно збільшити експозицію. Тобто кратність світлофільтра залежить від спектрального складу випромінювання, спектральної характеристики перепускання світлофільтра і спектральної чутливості приймача. Кожен світлофільтр має свій шифр, що включає в себе перші букви областей спектра перепускання або найменування світлофільтра, і номер, що визначає інші характеристики.

Крім розглянутих вище оптичних деталей у різних приладах і пристроях застосовують [16,20]:

лінзи Френеля - лінзи зі східчастою заломлюючою поверхнею у вигляді паралельних канавок;

аксикони - які порушують гомоцентричність пучка;

оптичні растри - що представляють собою сукупність заломлюючих (лінзових) середовищ чи середовищ, що відбивають;

світловоди – направляючі системи для світлових хвиль.

3.5.3. Заломлення променів тонкою лінзою

Оптична деталь, обмежена двома заломлюючими вісесиметричними і центрованими поверхнями, називається лінзою. До тонких лінз звичайно відносяться лінзи, товщина яких мала в порівнянні з радіусами кривизни заломлюючих поверхонь. Заломлення світлових променів відбувається на оптичних поверхнях лінзи [20].

Спочатку розглянемо заломлення променів сферичною поверхнею. Припустимо, що сферична поверхня A' утворена середовищами 1 і 2 з показниками заломлення відповідно n_1 і n_2 . Радіус сферичної поверхні r , а $n_1 > n_2$ (рис. 3.23).

Визначаючи положення зображення A точкового предмета A і провівши геометричні розрахунки, одержимо так званий інваріант заломлення (інваріант Аббе) [11]:

$$n_1 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{S} \right) = n_2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{S'} \right).$$

Якщо $-S = -\infty$, то промені будуть паралельними оптичній вісі і зйдуться в задньому головному фокусі F' ; тобто $S' = f'$. Тоді задня фокусна відстань дорівнює

$$f' = \frac{n_2}{n_2 - n_1} r.$$

Для визначення проходження променів через двоопуклу лінзу використовуємо інваріант Аббе для другої поверхні, а потім складемо обидва інваріанти. Тоді одержимо формулу тонкої лінзи:

$$\frac{1}{S'} - \frac{1}{S} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Коли предмет знаходиться в нескінченності $S = -\infty$, тобто $S' = f'$ і

$$f' = \left[(n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]^{-1}.$$

Якщо товщиною лінзи d не можна знехтувати, то фокусна відстань і положення головних площин визначають за формулами ідеальної оптичної системи:

фокусна відстань

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \left(\frac{n-1}{n} \right)^2 \frac{d}{r_1 r_2},$$

положення головних площин

$$S_n = -f' \left(\frac{n-1}{n} \right) \frac{d_n}{r_2} ; \quad S_{n'} = -f' \left(\frac{n-1}{n} \right) \frac{d_n}{r_1},$$

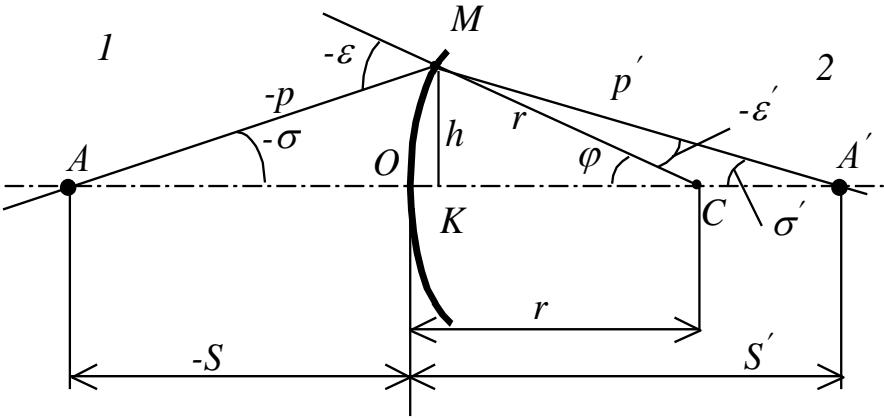


Рис.3.23. До пояснення заломлення тонкою лінзою

лінійне збільшення $\beta = \frac{-n_1 \sigma}{n_2 \sigma'}$.

Оскільки $S \cdot \sigma = S' \cdot \sigma'$, то одержимо рівність

$$y n_1 \sigma = y' n_2 \sigma',$$

яку назвемо інваріантом Гюйгенса - Гельмгольца, який характерний тим, що зберігає свою величину на всіх поверхнях оптичної системи.

3.5.4. Створення оптичного зображення

Для побудови зображення геометричним шляхом необхідно задати положення фокальних і головних площин лінзи чи оптичної системи [11,12].

Нехай у є деяка точка предмета l , $[H]$ і $[H']$ - головні площини, F і F' - головні фокуси (рис.3.24).

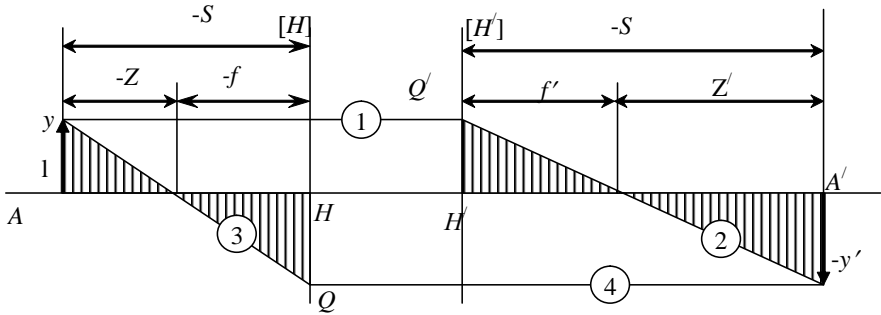


Рис.3.24. До процесу створення оптичного зображення

Для одержання зображення точки у досить провести пряму Q' , паралельну оптичній вісі; пряму QF' через фокус F' системи; пряму yQ через фокус F системи і пряму Qy' , паралельну оптичній вісі системи. Точка перетину прямих Qy' і Qy' дає нам зображення точки $у$. З подібності трикутників yAF і FQH ; $y'A'F'$ і $F'HQ'$ випливає:

$$\frac{-y'}{y} = \frac{-f}{-z} = \frac{z'}{f'}$$

Тоді одержимо рівняння $z \cdot z' = f \cdot f'$, яке називається рівнянням Ньютона.

З рис.3.24 видно, що:

$$-z = -S + f \quad \text{і} \quad z' = S' - f'$$

Підставимо значення $-z$ і S' у рівняння Ньютона і розділимо обидві частини на SS' . Тоді

$$\frac{f}{S} + \frac{f'}{S'} = 1$$

Для тонкої лінзи, у якої $-f=f'$, запишемо рівняння Гаусса.

$$\frac{1}{S'} - \frac{1}{S} = \frac{1}{f'}$$

У цьому випадку H і H' збігаються усередині лінзи, фокуси $-f$ і f' знаходяться на однакових відстанях від головної площини HH' .

3.5.5. Обмеження в оптичних системах

Апертурна діафрагма, обмежуючи пучок променів, що виходять з осьової точки предмета (рис. 3.25,*а*), визначає рівень освітленості площини зображення, а діафрагма, розташована в площині предмета чи зображення й обмежуюча лінійний розмір зображення, називається польовою діафрагмою (рис. 3.25, *б*) [11,12].

Якщо відомо положення і діаметр апертурної діафрагми, то її зображення в зворотному прямому ході променів називається вхідною (вихідною) зіницею системи.

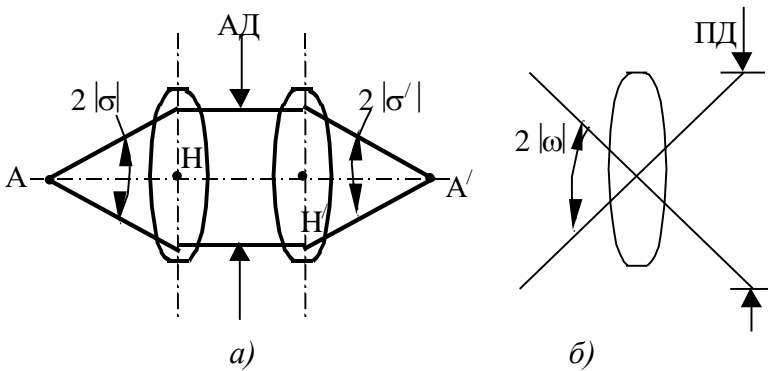


Рис.3.25. Апертурна і польова діафрагми

На рис. 3.26 показано положення і розмір вхідної і вихідної мнимих зіниць при розташуванні апертурної діафрагми між лінзами 1 і 2 оптичної системи. Вхідна і вихідна зіниці можуть бути і дійсними. Якщо апертурна діафрагма знаходиться перед оптичною системою (рис.3.26), то вхідна зіниця з нею збігається. Головний промінь проходить через центр P вхідної зіниці, центр апертурної діафрагми P_{AD} і центр P' вихідної зіниці.

Відношення діаметра D вхідної зіниці до задньої фокусної відстані називається відносним отвором оптичної системи, а величина K , зворотна відносному отвору називається діафрагмним

числом. Вхідна і вихідна зіниці є сполученими елементами оптичної системи.

Лінійне поле оптичної системи в просторі зображень (предметів) - найбільший розмір $2y'(2y)$ зображення, що лежить на кінцевій відстані.

Відповідно кутове поле оптичної системи в просторі предметів – $2w$, а в просторі зображень – $2w'$.

В утворенні зображень периферійних предметних точок головні промені можуть не брати участь. Це обмеження пучків променів називається віньетуванням, а діафрагма, що викликає обмеження - віньетууючою. Віньетууючою діафрагмою може бути

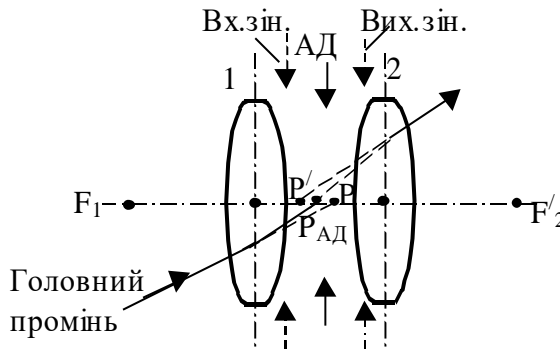


Рис.3.26. Положення і розмір вхідної і вихідної мнимих зіниць

будь-яка, крім апертурної і польової. Зображення віньетууючої діафрагми в просторі предметів називається вхідним вікном, а в просторі зображень – вихідним вікном. Віньетування, рівне 50%, вважається припустимим, тому кут $2w_{50}$ і прийнятий за кутове поле в просторі предметів [20].

3.5.6. Реальні оптичні системи

Реальні оптичні системи близькі до ідеальних, якщо виконуються такі умови [12]:

1. Світло надходить у вигляді вузьких пучків, близьких до оптичної вісі.

2. Пучки складають малі кути з оптичною віссю.

3. Показник переломлення постійний для всіх променів, що справедливо тільки для монохроматичного світла.

У реальній оптичній системі ці умови дотримуються не цілком, у цьому випадку оптична система викликає викривлення зображення, які називаються аберациями. Промені, що виходять з однієї точки об'єкта, не будуть сходитися в одній точці зображення, а створять деякий кружок, названий кружком розсіювання. Необхідно враховувати, що всі аберации мінімальні в області, близькій до оптичної вісі, з віддаленням від оптичної вісі аберации зростають, що приводить до відповідного збільшення кружка розсіювання.

У реальних оптичних системах на формування кружка розсіювання одночасно впливають всі аберации і дифракція на вхідному отворі оптичної системи, тому картина виходить досить складною.

3.5.7. Аберации оптичних систем

Оптичне зображення, яке створює лінза, має невисоку якість, що пояснюється не тільки її геометричними, а й фізичними властивостями. Використовувати лінзу як об'єктив недоцільно, оскільки різкість зображення, яке вона дає, неоднакова по всьому полю, прямі лінії біля країв викривлені, навколо основного зображення з'являється кольорова облямівка. Ці недоліки в роботі лінзи називають аберациями.

Кількісна оцінка величини аберации характеризується різницею координат точок зображення $\Delta u'$ та $\Delta x'$, отриманого реальною й ідеальною оптичною системою. Варто мати на увазі, що аберации оптичної системи принципово непереборні, тобто реальна система завжди має залишкові аберации.

Розрізняють аберации: монохроматичні (сферична, кома, астигматизм, дисторсія) і хроматичну. Аберации ділять на осьові, тобто недоліки зображень точок, які лежать на оптичній вісі

(сферична аберація), і польові - недоліки зображень точок, що лежать у межах деякого поля зору (кома, астигматизм) [20].

Сферична аберація та кома

Сферична аберація характерна для оптичних систем з круговою симетрією відносно оптичної вісі.

Сферична аберація - це нерізкість зображення точок предмета, які утворюються приосьовими променями [16]. Промені, які виходять з точок, що лежать поблизу оптичної вісі, проходячи через лінзу, перетинаються не в одній точці, а в кількох, утворюючи ряд зображень на оптичній вісі (рис. 3.27). З рис. 3.28 видно, що чим більше абсолютне значення кута σ , тим ближче до лінзи промінь, що вийшов, перетинає оптичну вісь.

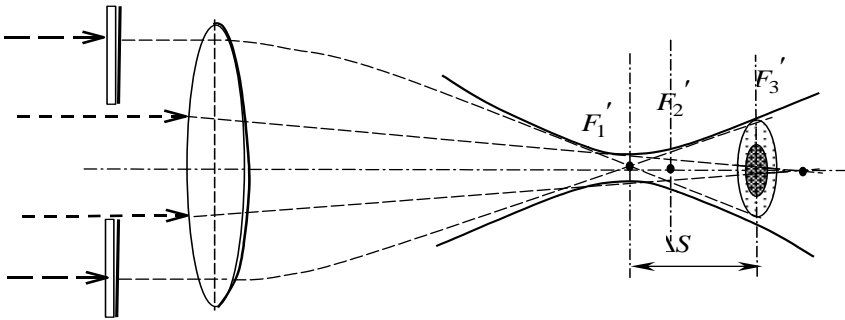


Рис. 3.27. Сферична аберація позитивної лінзи

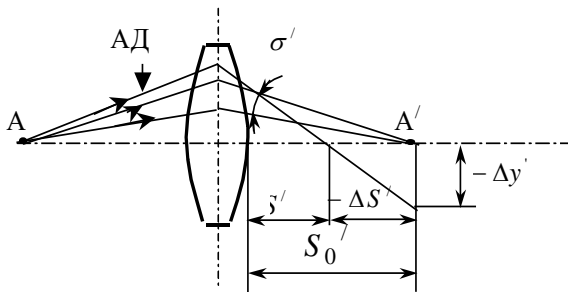


Рис.3.28. До пояснення сферичної аберації

Дане явище пояснюється збільшенням оптичної сили лінзи в міру віддалення променя від оптичної вісі. Вказане порушення гомоцентричності пучка можна характеризувати різницею $\Delta S'$ повздовжніх відрізків S' для реальної системи і ідеальної системи S_0' (параксiальних променів): $\Delta S' = S' - S_0'$.

Отже паралельні промені збігаються не в одній точці, а в кількох F_1', F_3' . Відстань ΔS між точками F_1' та F_3' називають повздовжньою сферичною аберациєю. Де б не помістили площину екрана у просторі зображення, дістати зображення точки предмета у вигляді саме точки не можна. Наявність повздовжньої сферичної аберациї приводить до того, що замість точки її зображення виходить у вигляді кружка розсіювання радіусом $\Delta Y = \Delta S' \operatorname{tg} \sigma'$. Цей відрізок характеризує величину поперечної сферичної аберациї. Зображення точки матиме вигляд розмитого кружечка (кружок розсіювання), утвореного від проекції на екран розбіжних пучків після їх заломлення різними ділянками лінзи.

Щоб визначити положення площини екрана, де зображення матиме найменший діаметр кружечка розсіювання (буде найрізкішим), описують поверхню, яка огинає всю множину променів заломленого пучка, і визначають найменшу площу перерізу F_2' цієї поверхні (каустики).

Зменшити сферичну аберацию можна шляхом введення в систему негативної лінзи, що має на відміну від позитивної лінзи сферичну аберацию іншого знаку (позитивну).

Сферичну аберацию також можна зменшити, зменшуючи діючий отвір за допомогою діафрагми. Тоді зображення буде різкішим, бо воно утворюватиметься тільки приосьовими променями.

Криві на рис. 3.29 відповідають оптичній системі з невикоректованою (а), виправленою для крайового променя (б) і перевиправленою (в) сферичними аберациями.

Сферична аберация виникає і при зображенні точок, які лежать у деякому просторі зовні оптичної вісі. При цьому промені ідуть через об'єктив похило, під деяким кутом до оптичної вісі і, пройшовши через лінзу асиметрично, також утворюють

кілька точок сходження (рис. 3.30, а). Такий процес називають аберациєю коми [11].

Таким чином, сутність аберациї коми полягає в тому, що симетричний відносно головного променя пучок, що входить в оптичну систему, стає асиметричним після виходу з системи (рис.3.30, а). Каустика стає несиметричною, внаслідок цього в площині екрана зображення точки має вигляд витягнутої плями, яка нагадує кому (рис.3.30, б).

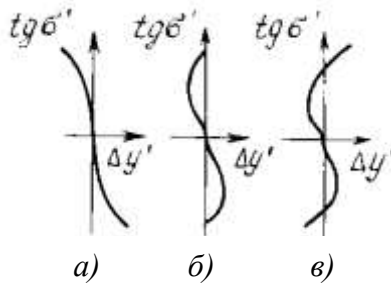


Рис.3.29. Сферичні аберациї

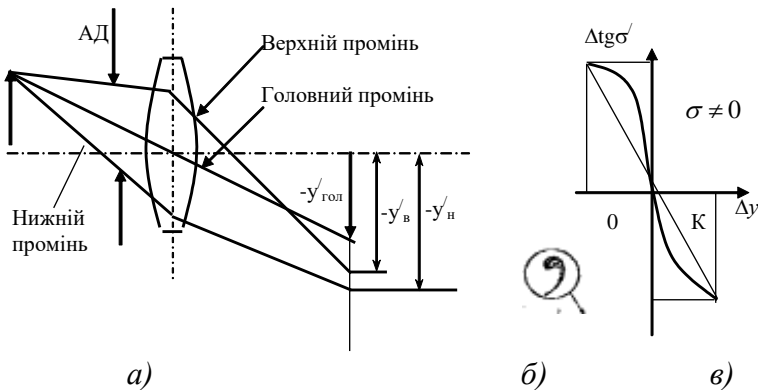


Рис.3.30. Кома

Причина порушення симетрії пучка та ж, що і для сферичної аберациї.

Для коми характерною є нерізкість межових частин зображення. Кома - одна з аберациї, яку найважче усунути. Частково пом'якшити її можна діафрагмуванням, повніше - застосуванням

складних оптичних систем.

Сферичну аберацію для меридіанних променів називають меридіанною комою, а для косих променів просто комою. Мірою аберації коми вважається величина

$$\Delta y' = \frac{y'_B + y'_H}{2} - y'_{ГОЛ}.$$

При відсутності сферичної аберації, тобто $y'_B = y'_H$, оптична система має тільки кому. Графічна залежність меридіанної коми від $\Delta tg \sigma' = tg \sigma' - tg \sigma'_{ГОЛ}$ показана на рис.3.30, в. Оптичні системи, у яких виправлені сферична аберація і кома, називають апланатами.

Астигматизм і пов'язана з ним кривизна поля зображення

Астигматизм, або безточковість - це неможливість одержати зображення точки у вигляді точки [20]. Це явище можна спостерігати відносно тих точок предмета, які не лежать на головній оптичній осі (польова аберація). Причина виникнення астигматизму полягає в тому, що заломлююча сила лінзи неоднакова в різних її перерізах. Наприклад, промені, які йдуть у площині меридіана, мають точку сходження далі від лінзи, ніж промені, які проходять через площину паралелі (оскільки поверхні лінзи - частини кульових поверхонь, то на них можна виділити, як і в кулі, паралелі і меридіани). Кривизна паралелі завжди (крім екватора) більша за кривизну меридіана. Отже, зображення точки, яка не розміщена на оптичній осі, подвійне. Як у меридіанальній, так і в сагітальній площині проекції променів розмивають це зображення в одному випадку вертикально, а в другому — горизонтально (рис.3.31).

Таким чином, астигматизм проявляється для польових точок зображення предмета та полягає в тім, що зображення однієї і тієї ж точки предмета, що формується нескінченно тонкими меридіанальними та сагітальними пучками променів, виходить у вигляді двох точок, що не збігаються з площиною зображення параксіальними променями.

Відстань між цими точками по головному променю і астигматична різниця $\Delta z'_a = z'_s - z'_m$ (рис.3.32).

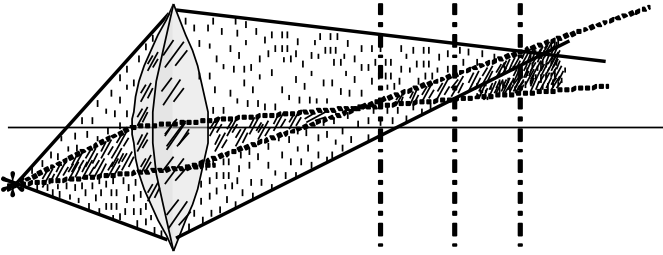


Рис.3.31. Астигматизм

При зміні координати у точки В її меридіанне зображення B'_m і сагітальне B'_s будуть зміщуватись по кривим y'_m та y'_s відповідно. Поверхня, що утворена поворотанням між y'_m та y'_s , кривої y' навколо оптичної осі і сама крива y' характеризує кривизну зображення.

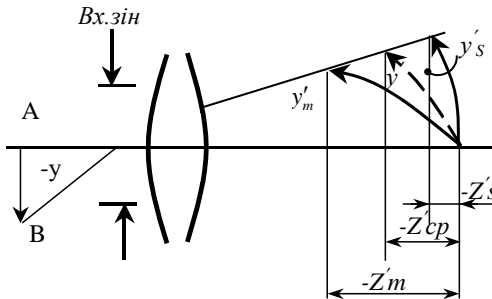


Рис. 3.32. Астигматична різниця

Покажемо предмет та його зображення меридіанальними і сагітальними променями (рис. 3.33).

Одночасно можна спостерігати і кривизну поля зображення, яка полягає в тому, що різке зображення, яке дає лінза, утворюється не на плоскій, а на сферичній поверхні, тому різке зображення на плоскій поверхні екрана одержати не можна (якщо воно різке по центру, то нерізде по краях і навпаки), оскільки поверхні меридіанального і сагітального зображень не збігаються з фокальною площиною.

Поверхню, яка займає середнє положення між меридіанальним і сагітальним зображеннями, називають поверхнею середньої кривизни [12].

Астигматизм і кривизна зображення зменшуються за рахунок раціонального вибору кривизни заломлюючих поверхнь лінз, їхньої товщини, діаметра й показника заломлення. Астигматизм зменшують, комбінуючи оптичні стекла - важкий крон і легкий флінт. Оптичні системи, у яких задовільно виправлений

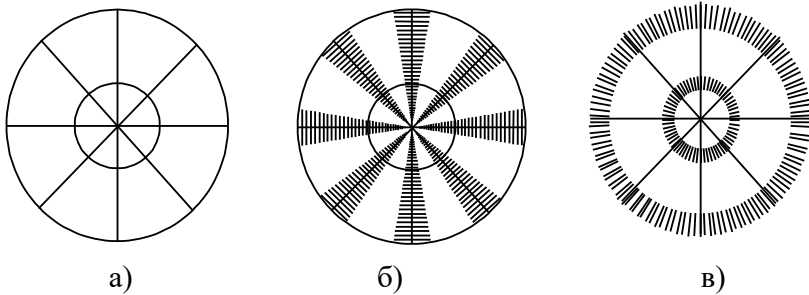


Рис. 3.33. Предмет та його зображення меридіанальними і сагітальними променями

астигматизм, називаються анастигматами. Практично усі фотооб'єктиви можуть бути віднесені до анастигматів за рахунок обмеження їхнього кутового поля, у межах якого вони дають задовільну якість зображення.

Дисторсія

Сталість збільшення по всьому полю незалежно від величини та форми предмета називається ортоскопією. Порухення колінеарної відповідності зображення та предмета (ортоскопії) обумовлене дисторсією оптичної системи. Дисторсія виражається в порушенні масштабу, а отже, у викривленні прямих ліній з віддаленням від центра поля зображення до його країв [20].

При дисторсії не погіршується різкість зображення, а викривляється його форма.

На величину дисторсії істотно впливає наявність та положення діафрагми. Масштаб зображення по краях збільшується, якщо діафрагма розміщена ззаду лінзи (подушкоподібна або позитивна дисторсія) (рис. 3.34, *a*). Масштаб по краях зображення зменшується, якщо діафрагма розміщена перед лінзою. Цей вид дисторсії називають бочкоподібним (негативна дисторсія) (рис. 3.34, *б*). Ортоскопічне зображення без дисторсії можна дістати, поєднавши дві лінзи з діафрагмою, розміщеною між ними (рис. 3.34, *в*).

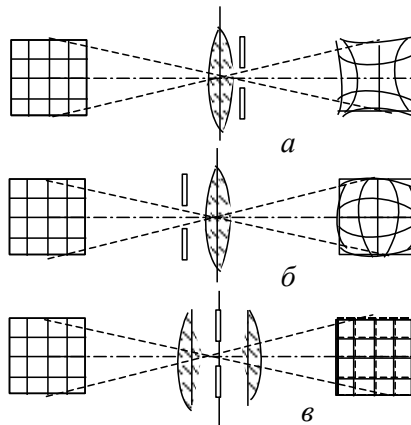


Рис. 3.34. Дисторсія

Величину дисторсії визначають як різницю між ординатою y' головного променя й ординатою y'_0 , що відповідає ідеальному зображенню $\Delta y' = y' - y'_0$.

Практично вдається розрахувати і виготовити оптичні системи, наприклад, фотооб'єктиви для топографічного знімання, у яких дисторсія не перевищує 0,01-0,03 мм по всьому полю. Такі оптичні системи з виправленою дисторсією називаються ортоскопічними. Відносна дисторсія $\Delta' = \Delta y' / y'_0$ величиною 3...5%, викликає помітні оком викривлення зображення і вважається припустимою.

Хроматичні аберації

Хроматичні аберації з'являються в оптичних системах в результаті проявлення некомпенсованості дисперсії, тобто роз-

кладання білого світла на монохроматичні складові при проходженні променів через заломлюючі середовища [12].

Причиною хроматичної аберації є незбігання фокальних площин різних довжин хвиль світлового пучка. Оскільки кожна окрема ділянка лінзи являє собою призму, що розкладає промінь білого світла на ряд кольорових променів, з яких короткохвильові заломлюються до основи призми більше, ніж довгохвильові, то точки сходження фіолетових і синіх променів F_C (рис. 3.35) лежать ближче до лінзи, ніж точки сходження жовтих $F_{Ж}$, оранжевих F_O і червоних $F_{Ч}$ променів. Отже, зображення тієї самої білої точки утворюється променями різних кольорів на різній відстані від лінзи. Де б не була розміщена площина екрана, зображення цієї точки буде нерізким, бо воно утворюється проекцією кольорових розмитостей (райдужною облямівкою) на основі зображення, що виникло під дією того кольору, у фокусі якого встановлено площину екрана.

Аберація оптичної системи, при наявності якої площини зображення предмета, утворені у променях різних довжин хвиль, зсунуті одна відносно другої уздовж оптичної осі, називається хроматичною аберацією положення, чи хроматизмом положення (рис.3.36).

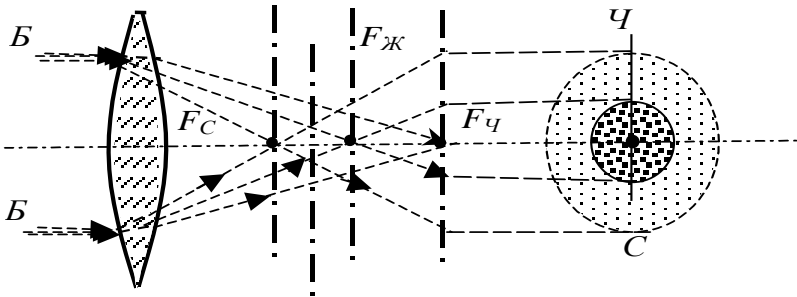


Рис. 3.35. Хроматична аберація

Хроматизм $\Delta S'_{\lambda_1 \lambda_2}$ виміряється різницею відстаней для двох довжин хвиль $\Delta S'_{\lambda_1 \lambda_2} = S'_{0\lambda_1} - S'_{0\lambda_2}$.

При наявності такої аберації в площині зображення точки

будуть мати кольоровий окрас і будуть розмитими.

Графіки хроматичної аберації положення приведені на рис. 3.37. Підбором матеріалів і фокусних відстаней позитивних (крива 1 на рис. 3.37) і негативних (крива 2 на рис. 3.37) лінз можна виправити хроматизм положення, тобто досягти ахроматизму (крива 3, названа кривою вторинного спектра).

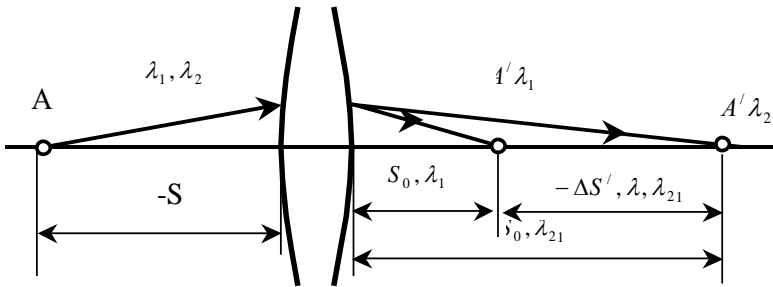


Рис.3.36. До пояснення хроматичної аберації положення

Хроматизм зменшується, якщо застосовувати комбінацію позитивної і негативної лінз, виготовлених з різних видів скла (крон і флінт). Повністю усунути хроматичну аберацію не можливо, як правило, її зводять до мінімуму для двох або трьох ділянок спектра.

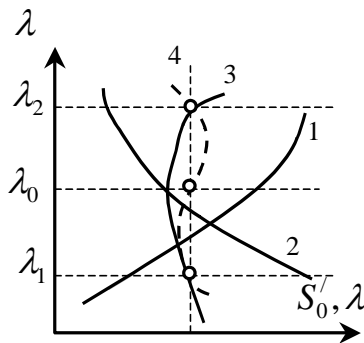


Рис. 3.37. Хроматична аберація положення

При ахроматизації дволінзового об'єктива можливе сполучення параксіальних зображень осьових точок для променів з довжинами хвиль λ_1 і λ_2 . Тому такі об'єктиви називаються ахроматами, а об'єктиви, у яких зменшений вторинний спектр - апохроматами [12].

Зміна розміру зображення для двох крайніх кольорів області спектра, у якій працює об'єктив, називається хроматичною аберациєю збільшення чи хроматизмом збільшення. При наявності цієї аберациї кольорові зображення позаосьових точок розташовуються на різних відстанях від оптичної вісі (рис.3.38). Хроматизм збільшення кількісно оцінюють по різниці значень y' для граничних довжин хвиль, тобто $\Delta y'_{\lambda_1 \lambda_2} = y'_{\lambda_1} - y'_{\lambda_2}$.

Хроматизм збільшення зростає при збільшенні полів оптичних систем і залежить не тільки від конструктивних параметрів і типу матеріалу лінз, але і від ступеня виправлення хроматизму положення і положення вхідної зіниці системи.

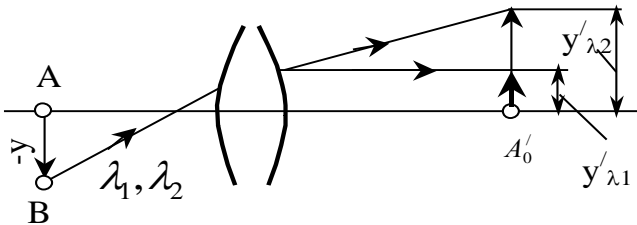


Рис. 3.38. Хроматизм збільшення

Сферохроматична аберация (сферохроматизм) або хроматична різниця сферичних абераций виникає через те, що сферична аберация в променях з довжинами хвиль λ_1 , λ_0 і λ_2 не однакова [11]. Чим більше апертурний кут, тим сильніше позначається вплив цієї аберациї, тобто сферохроматична аберация відноситься до абераций широкого як осьового, так і похилого пучка променів. Незважаючи на те, що в оптичній системі можуть бути виправлені сферична аберация і хроматизм

збільшення, наявність сферохроматизма пояснює фарбування зображення позаосьових точок.

3.6. Об'єктиви

Об'єктиви можуть бути охарактеризовані декількома параметрами, які визначають можливість і доцільність їхнього застосування для вирішення конкретних задач.

3.6.1. Параметри об'єктивів

Основними параметрами об'єктивів є фокусна відстань f ; відносний отвір d/f ; кут поля зору 2β ; роздільна фотографічна здатність R [17].

Освітленість зображення у фокальній площині об'єктива

Розглянемо закономірності, що визначають розподіл освітленості у фокальній площині об'єктива [17]. Нехай елементарна площадка площею ΔS у просторі предметів зображується оптичною системою у виді площадки $\Delta S'$ у просторі зображень (рис. 3.39).

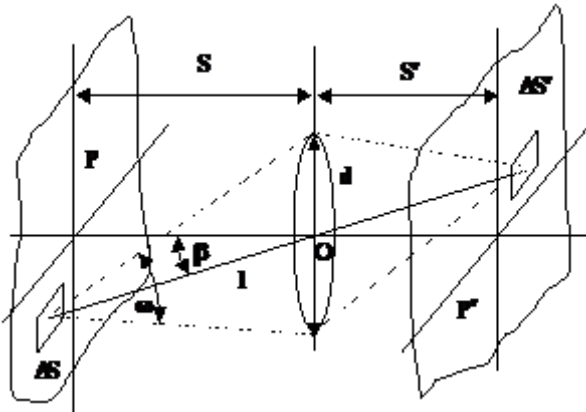


Рис.3.39. До розрахунку освітленості зображення, створюваного оптичною системою

Освітленість елемента зображення $\Delta S'$ визначається як відношення

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta S}.$$

Тут $\Delta \Phi$ - світловий потік, що падає від площі ΔS на поверхню діючого отвору об'єктива

$$\Delta \Phi = L \Delta S w \cos \beta,$$

де L - яскравість елемента ΔS ; β -кут, під яким видна площадка ΔS з центра вхідної зіниці оптичної системи; w - тілесний кут, у межах якого поширюється світловий потік.

Відомо, що яскравість предмета при дифузійному відображенні світла дорівнює

$$L = \frac{1}{\pi} \bar{r} E,$$

де E - освітленість предмета; r - середній коефіцієнт яскравості.

Якщо, крім цього, врахувати коефіцієнт пропускання шару атмосфери τ_{AT} і коефіцієнт пропускання оптичної системи τ_{OC} , тоді остаточно формула для розрахунку освітленості в площині зображення буде мати вид

$$E = \frac{1}{4} E \cdot \bar{r} \cdot \tau_{AT} \cdot \tau_{OC} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \frac{\cos^4 \beta}{(1 + \beta)^2}.$$

Для випадку космічної зйомки величина лінійного збільшення значно менше одиниці, тому величина $(1 + \beta)^2$ у знаменнику формули наближається до одиниці. Слід зазначити, що ця формула не враховує впливу паразитного засвітлення від серпанку.

Як видно з формули, освітленість зображення падає при збільшенні кута β тобто в міру видалення від оптичної осі, і це падіння відбувається досить швидко - пропорційно $\cos^4 \beta$. Слід зазначити, що існують оптичні системи, у яких завдяки особливостям конструкції освітленість по полю зображення розподіляється більш рівномірно — пропорційно $\cos^3 \beta$ і навіть $\cos^2 \beta$.

За інших рівних умов для точки зображення на оптичній осі ($\beta=0$) освітленість пропорційна відношенню $(d/f)^2$. Величина

$(d/f)^2$ називається геометричною світлосилою. Якщо при цьому враховується коефіцієнт пропускання оптичної системи, то отримана в такий спосіб величина $\tau_{OC}(d/f)^2$ зветься ефективною світлосилою.

Відношення діаметра діючого отвору оптичної системи до фокусної відстані називається відносним отвором.

Роздільна здатність об'єктивів

Здатність оптичної систем роздільно відтворювати на зображенні дрібні деталі оригіналу характеризує її роздільну здатність.

Розрізняють теоретичну, візуальну і фотографічну роздільну здатність об'єктивів [17].

Якщо аберації в оптичній системі цілком відсутні, то межу розрізнення встановлює дифракція світла на входному отворі. У цьому випадку зображення нескінченно малої світної точки буде відтворюватися у виді дифракційної плями кінцевого розміру, оточеного кільцями убутної інтенсивності.

На рис. 3.40. зображений світлорозподіл у дифракційному зображенні двох близько розташованих світних точок. Пунктиром позначена результуюча інтенсивність. Кружки розрізняються роздільно, як тільки величина ΔI досягає порога контрастної чутливості людського ока. Роздільна здатність у цьому випадку визначається величиною зворотної відстані між центрами кружків Δ .

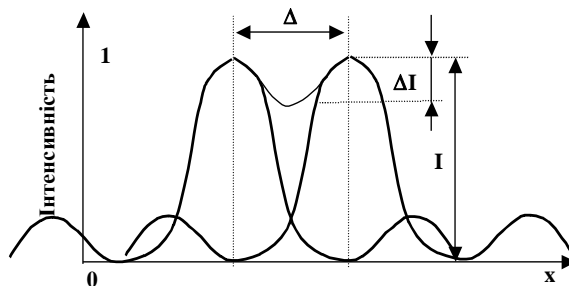


Рис.3.40. Світлорозподіл у дифракційному зображенні двох близько розташованих світлових точок

Релей запропонував за межу розділення прийняти таку відстань між двома точками Δ , при якій центр плями однієї точки сполучається з першим мінімумом іншої, тоді теоретична роздільна здатність R_T безаберацийного (ідеального) об'єктива визначається виразом

$$R_T = \frac{1}{1,21\lambda} \frac{d}{f'} \quad \text{чи} \quad R_T = 1470 \frac{d}{f'},$$

де d - діаметр вхідного отвору об'єктива; f' - фокусна відстань об'єктива; λ - довжина світлової хвилі.

Остання формула отримана для довжини світлової хвилі $\lambda = 566 \text{ нм}$.

Для визначення роздільної здатності реальних оптичних систем використовують не точкові джерела, а спеціальні тест-об'єкти, так названі штрихові міри.

Широко поширені міри двох основних типів: міри, що складаються з груп паралельних чорно-білих штрихів з різною кількістю штрихів у групі і радіальні міри (рис. 3.41).

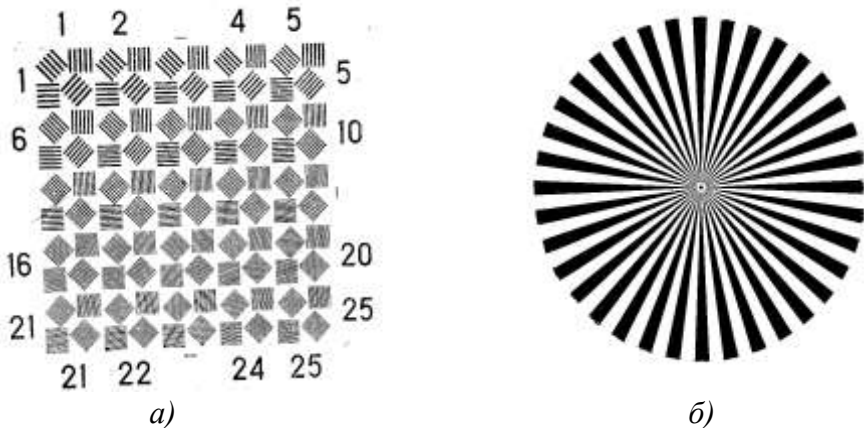


Рис. 3.41. Зображення мір для визначення роздільної здатності: *а* - штрихова міра; *б* - радіальна міра

Роздільна здатність визначається максимальною кількістю роздільно помітних чорних чи білих ліній на 1 мм зображення. При визначенні роздільної здатності зображення розглядають у

збільшувальний прилад, щоб зменшити похибки, внесені зоровою системою спостерігача. Якщо зображення міри, створюване об'єктивом, розглядається оком, то визначається візуальна роздільна здатність, а якщо розглядається фотографічне зображення, отримане на світлочутливому матеріалі за допомогою даного об'єктива, то визначається фотографічна роздільна здатність.

Роздільна здатність виміряється в лініях на міліметр, лін/мм чи мм^{-1} .

Штрихова міра зображена на рис.3.41. Кожен елемент штрихової міри (див. рис. 3.41, *a*) складається з чотирьох груп паралельних смуг однакової довжини і ширини, але різного напрямку. Якщо відстань між штрихами в групі *l*, то роздільна здатність кожної групи буде

$$R = l_R^{-1} .$$

Штрихова міра має звичайно 25 елементів. Ширина смуг убуває від елемента №1 до елемента № 25 за законом геометричної прогресії зі знаменником 0,94.

Радіальні міри мають вигляд, показаний на рис.3.41, *б*. Вони складаються з чорних і білих секторів однакового розміру, що чергуються. Використовуються міри з кількістю секторів 16, 36, 72 і більше.

Роздільна здатність при використанні радіальної міри підраховується за формулою

$$R = \frac{n}{\pi d_R} ,$$

де *n* - число пар секторів (один чорний, один білий); *d* – діаметр (в мм) кружка на зображенні міри, в межах якого всі сектори здаються злитими.

Міри характеризуються своїм контрастом *K*, що визначається виразом

$$K = \frac{L_1 - L_2}{L_1} .$$

Якщо контраст міри дорівнює одиниці, то вона називається мірою абсолютного контрасту.

Візуальна роздільна здатність об'єктива зв'язана з теоретичною роздільною здатністю наблизеним співвідношенням

$$R_{ВІЗ} \approx 0,8R_T.$$

Зменшення роздільної здатності у реальній оптичній системі пояснюється наявністю залишкових аберацій і похибками в процесі виготовлення.

Найбільш важливою характеристикою об'єктивів є фотографічна роздільна здатність, тому що вона визначається для сполучення об'єктивів плюс фотоприймач.

Якщо відома візуальна роздільна здатність об'єктива $R_{ВІЗ}$ і роздільна здатність фотоприймача $R_{ПР}$, то фотографічна роздільна здатність R визначається за наближеною формулою

$$\frac{1}{R^m} = \frac{1}{R_{ВІЗ}^m} + \frac{1}{R_{ПР}^m},$$

де m - показник, що змінюється в межах від 1 до 2 залежно від конкретного типу фотографічної системи. Для аерокосмічних фотосистем $m = 1,8$.

Більшість даних по фотографічній роздільній здатності вітчизняних об'єктивів приводиться для тест-об'єкта абсолютного контрасту $R_{ПР} = 75$ ліній/мм. Однак основні об'єкти космічного знімання мають невеликий контраст із фоном, тому для оцінки систем почали застосовувати міру малого контрасту, що у великому ступені відповідає умовам застосування.

Фотографічна роздільна здатність є прямим результатом впливу на пляму розсіювання фотографічної системи аберацій оптичної системи і процесів розсіювання світла у приймачі.

Оскільки величина аберацій збільшується від центра до периферії зображення, тоді і роздільна здатність теж зменшується від центра до краю зображення.

Залежність фотографічної роздільної здатності від величини відносного отвору об'єктива має наступний характер. Зі зменшенням відносного отвору фотографічна роздільна здатність спочатку росте, досягає максимального значення (завжди

$R_{max} < R_{nl}$), і потім зменшується. Це пояснюється наступним чином. При великому відносному отворі діаметр об'єктива макси-

мальний, вплив дифракції малий, але зображення будується широким пучком променів, що відповідає найбільшим абераціям. Зі зменшенням відносного отвору абераційний кружок розсіювання зменшується, тому що розміри світлового пучка починають наближатися до параксіальної області, але при цьому збільшується кружок розсіювання, обумовлений дифракцією.

Максимальна фотографічна роздільна здатність відповідає мінімальному сумарному впливу аберацій і дифракції.

Кут зору об'єктива

Об'єктив створює зображення нескінченної світної площини у виді кола, у центральній частині якого освітленість більше і роздільна здатність вище, ніж по краях. Центральна частина кола, у межах якої освітленість і різкість при цілком відкритій діафрагмі відповідають заданим вимогам, називається полем зображення, а кут 2β з центром у задній головній точці, що спирається на діаметр кола d_{gun} , що обмежує поле зображення, називається кутом зору об'єктива (рис. 3.42) [17].

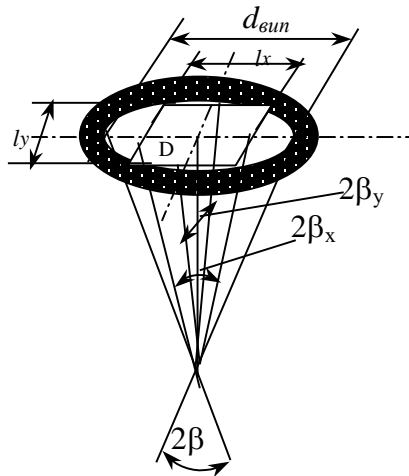


Рис. 3.42. Кут поля зору і кути зображення об'єктива

Максимальним форматом зображення є прямокутник, уписаний у коло, що обмежує поле зору.

3.6.2. Конструкції об'єктивів

Особливістю об'єктивів космічних датчиків зображень є те, що до них висуваються високі вимоги по роздільній здатності і контрасту зображення при одночасному забезпеченні великого кута поля зору.

Щоб забезпечити ці жорсткі вимоги, об'єктиви повинні бути дуже вдосконаленими оптичними системами.

За своїм призначенням об'єктиви розділяються на об'єктиви, призначені для космічної (або повітряної) розвідки, і на об'єктиви для топографічного знімання [17].

До об'єктивів розвідувальних систем пред'являються такі вимоги: при заданому куті поля зору забезпечити максимальну роздільну здатність при зніманні малоконтрастних об'єктів.

Об'єктиви для топографічних зйомок повинні забезпечити максимальний кут поля зору при мінімальних геометричних викривленнях.

Залежно від ступеня усунення аберацій (зокрема, від ступеня усунення астигматизму) об'єктиви бувають [16]:

астигмати - об'єктиви, що мають астигматизм і кривизну поля зображення;

анастигмати - об'єктиви, в яких усунуто всі аберації, зокрема астигматизм і кривизну поля зображення.

Залежно від оптичних систем об'єктиви бувають:

симетричні - об'єктиви, які мають парну кількість однакових компонентів, симетрично розміщених з обох боків діафрагми;

несиметричні - об'єктиви, компоненти яких розміщені не симетрично відносно діафрагми;

напівсиметричні - об'єктиви, в яких обидва компоненти однакового типу, але відрізняються деякими конструктивними

даними (радіусами кривизни, товщинами, відстанями, марками стекол лінз).

За способом з'єднання лінз у компоненти об'єктиви бувають: склеєні; несклеєні; напівсклеєні.

Як правило, об'єктиви космічних датчиків зображень мають постійне фокусування на нескінченність, тому що висота знімання в тисячі разів перевищує фокусну відстань об'єктивів.

Об'єктиви сучасних датчиків зображень залежно від значення параметрів і особливостей конструкції можна умовно розділити таким чином: універсальні об'єктиви; світлосильні об'єктиви; довгофокусні об'єктиви; ширококутові об'єктиви.

Універсальні об'єктиви - це об'єктиви із середніми значеннями основних параметрів, величини яких змінюються у межах: фокусна відстань – 150-500 мм; відносний отвір - менше 1:3,5; кут поля зору - менше 70° [17].

Універсальні об'єктиви звичайно використовуються в загальних цілях. Як приклад, може служити об'єктив «Індустар-51», оптична схема якого зображена на рис. 3.43, а.

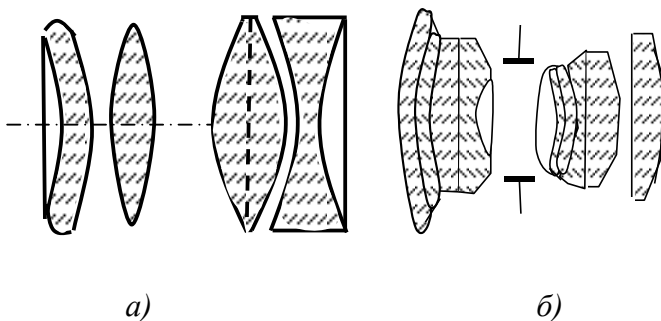


Рис.3.43. Оптичні схеми об'єктива «Індустар-51» (а) і об'єктива «Уран-27» (б)

Світлосильні об'єктиви - це об'єктиви, у яких відносний отвір більш 1:3,5. Ці об'єктиви мають невеликий кут поля зору ($20-50^\circ$) і, як правило, складаються з великої кількості лінз (5-8). Фокусна відстань світлосильних об'єктивів рідко перевищує

500 мм через технологічні труднощі виготовлення лінз великого діаметра.

Світлосильні об'єктиви застосовуються для знімання в умовах малої освітленості. Крім цього, подібні об'єктиви широко використовуються для аерофотознімання з малих висот при великих швидкостях польоту [17].

Прикладом світлосильного фотооб'єктива може служити об'єктив «Уран-27», оптична схема якого зображена на рис. 3.43,б.

Довгофокусні об'єктиви мають фокусну відстань більше 500 мм. Особливістю довгофокусних об'єктивів є порівняно невеликий кут поля зору (20-50°) і, як правило, невеликий відносний отвір (1:5-1:8). Основне призначення - використання в датчиках зображення, призначених для ведення розвідки з великих висот. З метою зменшення габаритів датчиків довгофокусні об'єктиви часто конструктивно виконуються у вигляді телеоб'єктивів.

Телеоб'єктиви відрізняються тією властивістю, що в них задня головна площина винесена вперед по оптичній осі і знаходиться поза оптичною системою. Тому в телеоб'єктиві фокусна відстань значно перевищує відстань між останньою лінзою і фокальною площиною. Телеоб'єктив складається з двох частин: передньої позитивної лінзи, чи системи лінз, що мають порівняно невелику фокусну відстань та великий відносний отвір, і негативної задньої лінзи, що збільшує фокусну відстань переднього компонента й зменшує відносний отвір всього об'єктива. Схематичне зображення ходу променів у телеоб'єктиві показано на рис. 3.44, а.

Прикладом об'єктива даної групи є об'єктив “Телемар-7М”, оптична схема якого зображена на рис. 3.44, б.

Для знімання з дуже великих висот, особливо для знімання з КА почали застосовуватися *понаддовгофокусні* об'єктиви з фокусною відстанню до 10 і більше метрів. Як такі об'єктиви, використовуються дзеркально-лінзові об'єктиви. У дзеркально-лінзових об'єктивах основним компонентом, що збирає промені, служить увігнуте дзеркало, чи система дзеркал. Чисто дзеркаль-

ні системи мають малі габарити, велику світлосилу і відсутність хроматичних аберацій, однак через великі сферичні аберації такі системи не можуть забезпечити значний кут зору [17]. Введення в систему лінзових компонентів для компенсації сферичної аберації дозволяє одержати оптичну систему, що поєднує в собі переваги як лінзових, так і дзеркальних систем: малі габарити і високу якість зображення при великій світлосилі і значному куті поля зору.

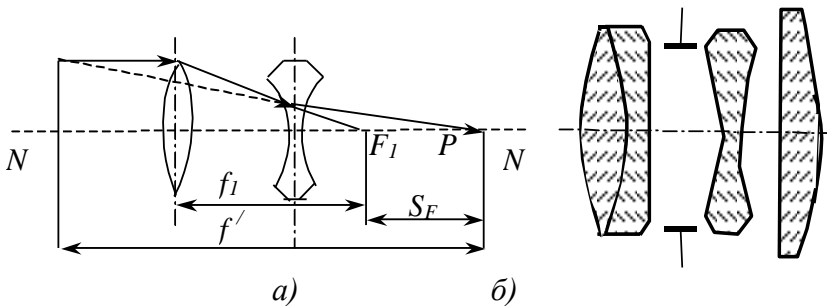


Рис.3.44. Хід оптичних променів у телеоб'єктиві (а) і оптична схема об'єктива «Телемар-7М» (б)

На рис. 3.45. зображена схема дзеркально-лінзового об'єктива подібного до встановленого на американському розвідувальному супутнику «Samos». Об'єктив має такі параметри: фокусну відстань 12,5 м, кут поля зору $0,33^\circ$, відносний отвір 1:12,5, фотографічну роздільну здатність 50мм^{-1} . Застосування дзеркально-лінзового об'єктива дозволило скоротити розміри знімальної апаратури до 2,1 м, тобто в шість разів у порівнянні з фокусною відстанню.

Дзеркально-лінзову схему об'єктивів у 1943 р. розробив радянський конструктор Д.Д. Максудов і вдосконалили у 1952-1953 роках радянські оптики Б.Н. Бегунов і Ф.С. Новик. Вона використовує заломлюючі поверхні лінз і відбивні поверхні сферичних дзеркал. Світло, відбите від об'єкта, який фотографують, падає на менісковий компенсатор (що коригує аберації дзеркал), в середній частині його встановлено опуклу дзеркальну поверхню 1. Пройшовши крізь передню лінзу-компенсатор,

світло падає на кільцеподібне увігнуте дзеркало 2, відбивається від нього на дзеркальну поверхню передньої лінзи, від якої знову відбивається, і, нарешті, падає на об'єктив 3, який збирає промені, утворюючи зображення в головній фокальній площині.

Щоб не засвітити зображення, в об'єктиві застосовують спеціальний конічний тубус з чорною рифленою поверхнею.

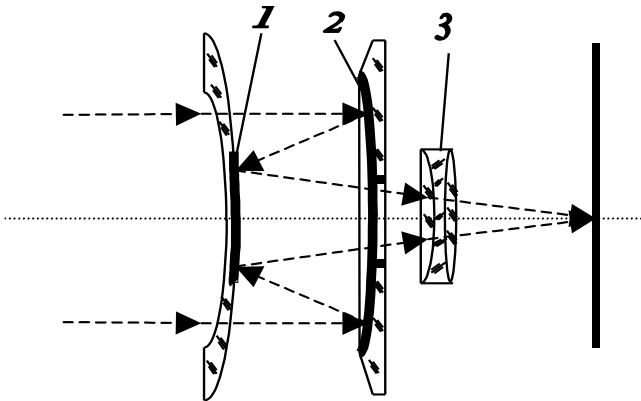


Рис. 3.45. Оптична схема дзеркально-лінзового об'єктива

Дзеркально-лінзові об'єктиви компактні, мають невеликі габаритні розміри, їх фокусна відстань досягає декількох метрів.

Ширококутові об'єктиви мають кут поля зору більше 70° . Як правило, ширококутові об'єктиви мають невелику фокусну відстань (50 - 250 мм) і невеликий відносний отвір (1:5 - 1:7), тому що зі збільшенням цих параметрів різко зростають величини залишкових аберацій і якість зображення погіршується, особливо на краю поля зору.

Ширококутові об'єктиви найчастіше застосовуються у датчиках зображень, призначених для оглядових і картографічних цілей, тому до них пред'являються особливо тверді вимоги за змістом геометричних перекручувань.

У ширококутових об'єктивах особливо помітно значне падіння освітленості зображення від центра до периферії. Цей недолік можна частково компенсувати застосуванням відтіню-

вачів - спеціальних світлофільтрів, у яких прозорість поступово збільшується від центра до краю. Іноді відтінюючий шар наносять безпосередньо на першу лінзу об'єктива. На рис. 3.46. показано розподіл освітленості по полю зображення ширококутового об'єктива з відтінювачем і без нього [17].

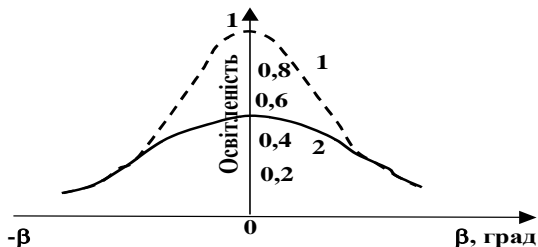


Рис.3.46. Розподіл освітленості по полю зображення без відтінювача (1) і з відтінювачем (2).

Прикладом ширококутового об'єктива може служити об'єктив «Оріон-1», оптична схема якого зображена на рис. 3.47.

Слід зазначити, що зроблений поділ об'єктивів є умовним і не вичерпує всього різноманіття особливостей їхнього застосування і конструкцій.

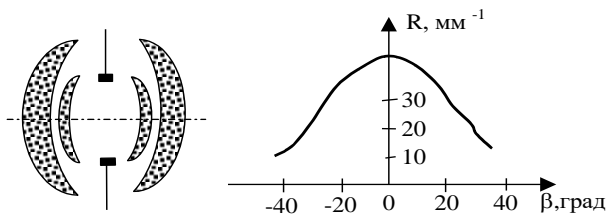


Рис.3.47. Оптична схема об'єктива «Оріон-1» і розподіл його роздільної здатності по полю зображення

3.8. Приймачі оптичного випромінювання

Приймачі оптичного випромінювання призначені для виявлення і виміру енергії електромагнітних хвиль оптичного діапазону. Розглянемо класифікацію і конструкцію, параметри,

характеристики та принципи роботи приймачів оптичного випромінювання.

3.8.1. Класифікація приймачів оптичного випромінювання

Принцип дії приймачів випромінювання (ПВ) заснований на взаємодії випромінювання з речовиною чуттєвого елемента. За принципом дії ПВ поділяються на три групи (рис.3.52):

теплові, у яких енергія випромінювання перетворюється в теплову, а потім частина теплової енергії, пропорційна величині вхідної енергії випромінювання, перетворюється в сигнал, зручний для реєстрації;

фотонні, у яких здійснюється пряма взаємодія між фотонами випромінювання й електронами матеріалу чуттєвого елемента;

пондермоторні, що використовують механічну дію (тиск) оптичного випромінювання [20].

Прикладом останніх є крутильні ваги.



Рис. 3.52. Класифікація приймачів випромінювання

Теплові ПВ у свою чергу поділяються на термоелектричні, термоопору, піроприймачі й оптикоакустичні.

У термоелектричних ПВ енергія фотонів перетворюється в теплову, під дією якої виникає термоелектрорушійна сила між холодним і нагрітим спаями різнорідних металів або напівпровідників.

Термоопори (болometri) при нагріванні потоком фотонів змінюють свою провідність.

У піроприймачах використовується залежність діелектричної постійної речовини, розташованої між обкладинками конденсатора, від температури. Особливістю піроприймача є те, що його вихідний сигнал пропорційний швидкості зміни його температури, а не величині температури.

В оптико-акустичних ПВ тепла енергія перетворюється в зміну об'єму газу, що викликає прогин мембрани, яка є обкладинкою конденсатора, і зміну ємності цього конденсатора.

У космічній апаратурі найбільш широке застосування знаходять фотоелектричні і теплові приймачі оптичного випромінювання, призначені для перетворення оптичних сигналів в електричні.

До приймачів випромінювання відносять також пристрої, які фіксують розподіл світлового потоку по поверхні чуттєвого шару приймача (зображення). Такі приймачі випромінювання називають формувачами сигналів зображення. Фотоелектричний чи тепловий приймач випромінювання є найважливішим елементом будь-якого оптико-електронного приладу. Саме він здійснює зв'язок між оптичною й електричною частинами приладу; у ньому відбуваються процеси перетворення енергії одного виду в іншій [21].

Фотоелектричні приймачі реагують безпосередньо на окремі кванти оптичного випромінювання - фотони. Дані приймачі на відміну від теплових мають селективне поглинання, а отже і селективну чутливість до поліхроматичного випромінювання [11].

Якщо, під дією поглиненої оптичної енергії, з чуттєвого шару в інше середовище чи в вакуум емітуються електрони (зовнішній фотоефект), то такі прилади називають фотоemisійними.

Коли під впливом прийнятої енергії оптичного випромінювання відбувається переведення електрона зі зв'язаного стану у вільний, тоді такі приймачі називаються приймачами з внутрішнім фотоефектом (напівпровідниковими).

Припустимо, що на фоточуттєвий шар приймача падає монохроматичний потік випромінювання $\Phi_{e,\lambda}$. Потоку відповідає число поглинених фотонів у секунду $N_\phi = \Phi_{e,\lambda} / h\nu$. У результаті перетворення оптичного сигналу в електричний, кількість утворених ними фотоелектронів чи електронно-діркових пар становить:

$$N_e = \eta_\lambda \Phi_{e,\lambda} / h\nu,$$

де величина $\eta_\lambda = N_e / N\phi$ називається квантовою ефективністю. Помноживши N_e на заряд електрона e , одержимо значення фотоструму i , викликаного потоком $\Phi_{e,\lambda}$:

$$i = \frac{e\eta_\lambda \Phi_{e,\lambda}}{h\nu} = \frac{\eta_\lambda \Phi_{e,\lambda}}{Q_{\Phi,e}}, \quad Q_{\Phi,e} = \frac{h\nu}{e} = \frac{1,24}{\lambda},$$

де $Q_{\Phi,e}$ - енергія фотона в джоулях (Дж). Для фотоemisійних приймачів:

$$\eta_\lambda = N_e / N\phi < 0,2,$$

а для напівпровідникових:

$$\eta_\lambda = N_e / N\phi < 0,9.$$

Один із проявів внутрішнього фотоефекту - зміна електропровідності матеріалу чуттєвого шару. Фотоприймачі, засновані на зміні фотопровідності, називаються фоторезисторами [30].

Прояв внутрішнього фотоефекту викликає виникнення фото-ЕРС у зоні контакту метал-напівпровідник. Це явище вентильного фотоефекту і такі приймачі називаються вентильними приймачами чи фотоприймачами з замикаючим шаром. Фотострум у ланцюзі вентильних приймачів виникає і під час відсутності зовнішньої напруги живлення [25].

Якщо за контактуючу групу використовуються p - і n - напівпровідники, то уздовж p - n переходу виникає подовжня чи бічна різниця потенціалів. Це приймачі з подовжнім чи бічним вентиляним фотоефектом. Подовжній чи бічний фотоефект виявляється при нерівномірній освітленості p - n переходу.

Вентильні приймачі на основі електронно-діркових переходів, що працюють із прикладеною зовнішньою напругою, називаються фотодіодами. Фотодіоди із внутрішнім транзисторним посиленням фотоструму називаються фототранзисторами, а з лавинним посиленням - лавинними фотодіодами.

Нагрівання чуттєвого шару теплових приймачів приводить до зміни їхнього опору (болometri), діелектричної проникності (піроелектричні приймачі), обсягу газу (оптико-акустичні приймачі оптичного випромінювання) тощо.

За спектральною чутливістю приймачі поділяються на приймачі, що працюють в ультрафіолетовій області, у видимій області, у ближній ІЧ-області, у середній ІЧ-області, у далекій ІЧ-області спектра [12].

За робочою температурою чуттєвого шару приймачі бувають неохолоджувані ($T=300^{\circ}\text{K}$), охолоджувані ($T=38-195^{\circ}\text{K}$), глибокоохолоджувані ($T<20^{\circ}\text{K}$) [25].

У інфрачервоних системах можуть застосовуватися приймачі випромінювання (рис. 3.53), що працюють у ближній ІЧ області (0,78...1,4мкм), середній ІЧ області (1,4...6,0мкм) і далекій ІЧ області (6,0...1000мкм) [21].

У ближній ІЧ області добре працюють фотоemisійні приймачі із сурм'яно-цезієвим фотокатодом, сірчато-талієві і сірчато-свинцеві фоторезистори, германієві і кремнієві фотодіоди і фототранзистори.

У середній ІЧ області працюють сірчато-свинцеві, телуристо-свинцеві і селенисто-свинцеві фоторезистори, фоторезистори із сурм'янистого індію і германію, легованого золотом.

У далекій ІЧ області працюють фоторезистори з германію, легованого цинком чи ртуттю, а також фоторезистори на основі потрійних сполук, наприклад кадмію-ртуті-телуру (КРТ).

Приведена класифікація приймачів випромінювання є досить умовною, тому що багато приймачів можуть використовуватися в різних ділянках електромагнітного спектра.

Для охолоджуваних приймачів випромінювання звичайно вказуються точки кипіння різних речовин, використовуваних для охолодження [12]:

- 194,7⁰K - твердої вуглекислоти (сухого льоду);
- 77,4⁰K - рідкого азоту;
- 27,3⁰K - рідкого неону;
- 4,3⁰K - рідкого гелію.

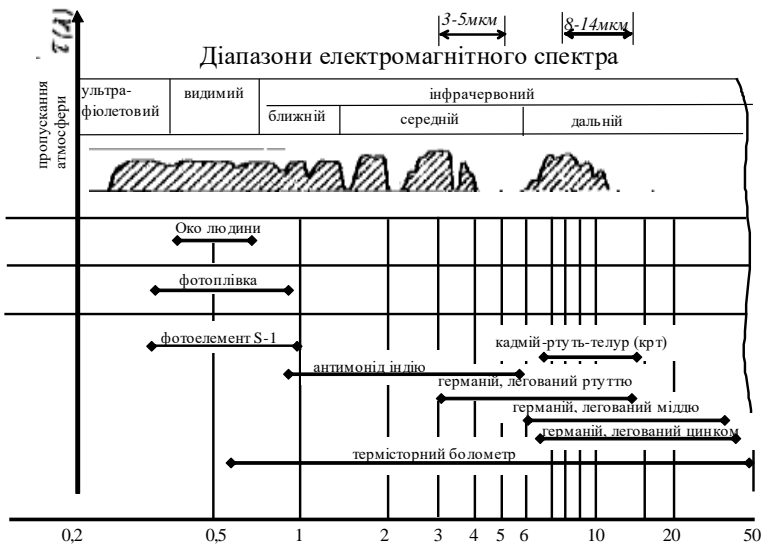


Рис.3.53. Пропускання атмосфери і чутливість різних приймачів випромінювання

3.8.2. Параметри приймачів оптичного випромінювання

Чутливість. Розрізняють монохроматичну й інтегральну чутливості приймачів оптичного випромінювання. У загальному випадку чутливість визначається відношенням зміни вихідного сигналу приймача (наприклад, струму, напруги, опору тощо) до потоку, що викликав цю зміну, чи опроміненості. Відповідно до цього монохроматичну чутливість можна записати у виді [20]:

$$S_{\lambda} = \frac{i}{\Phi_{e,\lambda}} = \frac{e\eta_{\lambda}}{h} = \frac{\lambda}{1.24} \eta_{\lambda}, \text{ [A/Вт]}.$$

Інтегральна чутливість приймачів:

$$S_i = \frac{i}{\Phi_e}, \text{ [A/Вт]},$$

що працюють у видимому діапазоні, визначається для випромінювання джерела - лампи накаливання з $T_C=2854^{\circ}\text{K}$.

Для приймачів інфрачервоного випромінювання інтегральна чутливість виміряється для випромінювання чорного тіла при $T=373^{\circ}\text{K}$ і $T=573^{\circ}\text{K}$ [22].

Якщо вихідний сигнал - струм, то говорять про струмову чутливість S_i ; якщо напруга, то говорять про вольтову чутливість S_u . Відповідно до цього чутливість приймачів оптичного випромінювання може вимірятися в А/Вт, В/Вт тощо.

Рівень шуму оцінюється середньоквадратичним значенням $\sqrt{\bar{u}_{ш}^2}$ шуму чи дисперсією $\bar{u}_{ш}^2$. Розподіл потужності шуму за спектром - спектральна щільність шуму $Q_{ш}(f)$ [12].

Основні види шумів такі: тепловий, дробовий, токовий, радіаційний.

Тепловий шум, викликаний хаотичним тепловим рухом вільних електронів у провіднику з опором R_H

$$\bar{u}_{\phi}^2 = 4k_B R_H T \Delta f,$$

де $k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - стала Больцмана; T - температура приймача; R_H - опір навантаження; Δf - смуга частот фільтра навантаження приймача.

Дробовий шум - наслідок флуктуації в часі числа електронів, що емітуються, чи кількості утворених електронно-діркових пар

$$\bar{u}_{ДР}^2 = 2ei_0R_H^2\Delta f ,$$

де e - заряд електрона; i_0 - середнє значення струму.

Токовий шум містить у собі генераційно-рекомбінаційний, модуляційний і контактний шуми:

$$\bar{u}_i^2 = A_T i_0^2 R \frac{\Delta f}{f} ,$$

де A_T - чисельна стала для кожного типу приймача (наприклад, для фоторезистора $A_T=10^{-11} \dots 10^{-12}$).

Радіаційний (фотонний) шум визначається флуктуаціями сигналу, що попадає на приймач, та елементами самого приймача

$$\bar{u}_p^2 = 8M_e k_A \sigma \Delta f S_u^2 (T_{\text{АЕІ}}^5 + T_{\text{ІА}}^5) ,$$

де M_e - випромінювальна здатність джерела; A - площа чуттєвого шару; $T_{\text{ВІП}}$ - температура випромінювача; $T_{\text{ІВ}}$ - температура приймача випромінювання; S_u - вольтова чутливість приймача.

Якщо окремі шуми некорельовані, то

$$\bar{u}_u^2 = \bar{u}_T^2 + \bar{u}_{ДР}^2 + \bar{u}_i^2 + \bar{u}_p^2 .$$

Граничний потік - мінімальний потік випромінювання, що викликає на виході приймача сигнал, що перевищує значення шуму в m разів [20]. Як правило, граничний потік визначають при $m=1$, тобто

$$\Phi_{ГР} = \frac{\sqrt{\bar{u}_u^2}}{S_u} .$$

Оскільки дисперсія шуму залежить від ширини смуги Δf , то часто граничний потік оцінюють як:

$$\Phi_{ГР,\Delta f} = \frac{\sqrt{\bar{u}_{u,\Delta f}^2}}{S_u} [\text{Вт}\cdot\text{Гц}^{-1/2}] ,$$

де $\bar{u}_{u,\Delta f}^2$ - дисперсія шуму при смузі частот $\Delta f=1\text{Гц}$.

Величина $D=1/\Phi_{ГР,\Delta f}$ називається виявляльною (детектуючою) здатністю. Якщо врахувати залежність чутливості від розмірів чуттєвого шару, що особливо характерно для напівпро-

відникових приймачів, то для порівняння вводять питому нормовану детектуючу чи виявляльну здатність:

$$D^* = \frac{S_u}{\sqrt{\bar{u}_{u,\Delta f,A}^2}} \text{ [см}^2\text{Гц}^{1/2}\text{/Вт]},$$

де $\bar{u}_{u,\Delta f,A}^2$ - дисперсія шуму приймача при $\Delta f=1\text{Гц}$ і $A=1\text{см}^2$.

Часто використовують величину D_λ^* .

Постійна часу - проміжок часу, протягом якого вихідна величина досягає 63% сталого значення при тривалому опроміненні чуттєвого шару; позначається τ_{III} , вимірюється в секундах.

Коефіцієнт використання оцінює ефективність прийому випромінювання чорного тіла чи іншого джерела:

$$\eta = \frac{\int_0^\infty S(\lambda) \cdot M_e(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty M_e(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^\infty S(\lambda) \cdot M_e(\lambda) d\lambda}{\sigma T^4},$$

де $S(\lambda)$ - відносна спектральна чутливість приймача; $M_e(\lambda)$ - спектральна випромінювальна здатність чорного тіла; T - температура чорного тіла.

Конструктивні параметри визначають площу, конфігурацію, кількість чуттєвих елементів у чуттєвому шарі, характеристики оптичних властивостей, напругу живлення тощо.

Опір приймача відіграє важливу роль при узгодженні приймача з підсилювачем. Фоторезистори оцінюються темновим опором R_m , фотодіоди - динамічним R_g .

У таблиці 3.4 приведені основні параметри приймачів ІЧ випромінювання.

3.8.3. Основні характеристики приймачів оптичного випромінювання

Спектральна характеристика - залежність спектральної чутливості від довжини хвилі випромінювання

$$S_i(\lambda) = \frac{di}{d\Phi_e(\lambda)}, [\text{A/Вт}].$$

Звичайно використовують нормовану величину (відносну спектральну чутливість)

$$S_i(\lambda) = \frac{S_i(\lambda)}{S_{iMAX}(\lambda)}.$$

Спектральна чутливість визначається типом матеріалу чуттєвого шару [20].

Частотна характеристика - залежність чутливості приймача від частоти модуляції сигналу $S_i = \psi(f)$. Смуга пропускання зв'язана з постійною часу приймача [23]:

$$\Delta f \approx \frac{1}{3 \cdot \tau_{ПВ}}.$$

Таблиця 3.4

Параметри приймачів ІЧ випромінювання

Тип приймача	CdHgTe	Ge:Zn	Ge:Au	InSb
Температура приймача T , К	77	5	60	77
Поле зору приймача Ω , ср.	$\pi/3$	$\pi/3$	$\pi/3$	$\pi/3$
Частота модуляції f , Гц	$1 \cdot 10^3$	$0,4 \cdot 10^3$	$0,4 \cdot 10^3$	$0,4 \cdot 10^3$
Постійна часу τ , с	$1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Максимум спектральної характеристики λ_{max} , мкм	10,6	34,0	5,0	5,1
Довгохвильова границя (50%), мкм	13	40	7,5	5,
Темновий опір R_T , Ом	2.5	$0,5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$
Питома виявлювальна здатність $D^*(\lambda_{max})$, см·Гц ^{1/2} Вт ⁻¹	$5 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{11}$
Межа $D^*(\lambda_{max})$, обмежена фотонним шумом	$8,5 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{11}$

(254K,Ω), $D^*_{оф}(\lambda_{max})$				
-------------------------------------	--	--	--	--

ПРИМІТКА. CdHgTe і InSb- фотовольтові приймачі (фотодіоди у вентильному режимі); Ge:Zn і Ge:Au - фоторезистори на основі германія, легованого відповідно цинком і золотом; $D^*_{оф}$ - гранична виявляльна здатність.

Енергетична чи світлова характеристика - залежність фотоструму від величини падаючого потоку при постійній напрузі живлення, тобто

$$i_{\Phi} = f(\Phi).$$

Вольт-амперна характеристика - залежність фотоструму від напруги живлення $i_{\Phi} = f(U_{ж})$. Ця характеристика дозволяє визначити оптимальну напругу живлення з метою забезпечення максимального відношення сигнал/шум, лінійності світлової характеристики тощо.

Спектр потужності шуму - розподіл дисперсії шуму за частотами $G_{ш}(f)$.

Температурні характеристики - залежності різних параметрів приймачів оптичного випромінювання від температури чуттєвого шару.

3.8.4. Фотоелектричні приймачі оптичного випромінювання

В наш час в космічній техніці широко використовуються напівпровідникові ПВ, а з їх числа – фоторезистори, фотодіоди та формувачі відеосигналів. Тому в рамках даного підрозділу велику увагу буде приділено саме їм.

Фоторезистори. Даний приймач являє собою пластинку або плівку фоточуттєвого напівпровідника, обладнану двома електродами. При подачі напруги до електродів за умови відсутності опромінення тече темновий струм. При опроміненні приймача фотопровідність плівки змінюється й утвориться фотострум, величина якого пропорційна інтенсивності падаючого опромінення. Величина фотоструму залежить також від прикла-

деної напруги, способу опромінення й особливостей конструкції приймача [20].

Спектральна чутливість фоторезисторів, залежно від використовуваного чуттєвого матеріалу, лежить у широких межах - від видимої до далекої інфрачервоної області спектра. Відносна спектральна чутливість деяких фоторезисторів приведена на рис. 3.54.

За своїми електричними властивостями фоторезистори нічим не відрізняються від звичайних резисторів і включаються в коло постійного чи перемінного струму послідовно з опором навантаження R_H (рис. 3.55).

Під час відсутності опромінення через фоторезистор протікає темновий струм i_T , що дорівнює:

$$i_T = \frac{U_{\text{ж}}}{R_T + R_H},$$

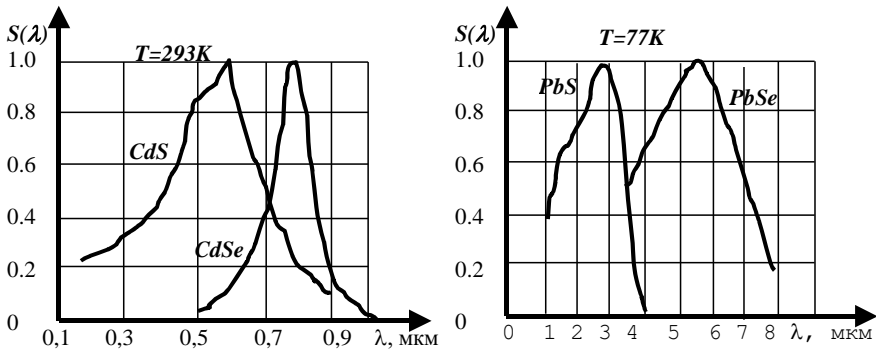


Рис. 3.54. Відносна спектральна чутливість фоторезисторів

де R_T - темновий опір фоторезистора.

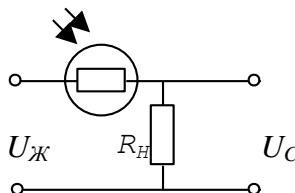


Рис. 3.55. Схема підключення фоторезистора

Цей струм обумовлює падіння напруги на опорі навантаження - темнову напругу:

$$U_T = i_T R_H = \frac{U_{\text{ж}} R_H}{R_T + R_H}.$$

Характер зміни опору фоторезистора R_Φ від величини падаючого потоку випромінювання показаний на рис. 3.56.

При невеликих (біляпорогових) значеннях потоків випромінювання функція $R_\Phi(\Phi)$ є близькою до лінійної й описується виразом [22]:

$$R_\Phi = R_T - b\Phi,$$

де b - крутість характеристики, $b = \frac{\Delta R_\Phi}{\Delta \Phi}$.

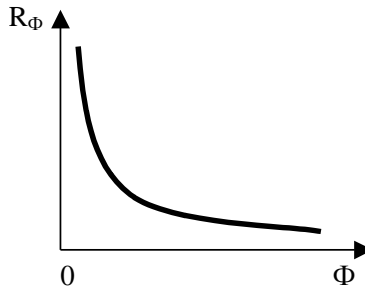


Рис.3.56. Характер зміни опору фоторезистора R_Φ від величини потоку

Струм у колі опроміненого фоторезистора визначається як:

$$i_\Phi = \frac{U_{\text{ж}}}{R_\Phi + R_H}.$$

Падіння напруги на опорі навантаження, яке обумовлюється випромінюванням, знаходиться як:

$$U_\Phi = i_\Phi R_H = \frac{U_{\text{ж}} R_H}{R_\Phi + R_H}.$$

Обумовлена випромінюванням величина сигналу на виході схеми, зображеної на рис. 3.55, дорівнює:

$$U_C = U_\Phi - U_T.$$

При біляпороговому опроміненні $R_\Phi \approx R_T$. Отже $b\Phi \ll R_T$. З врахуванням цього вольтова чутливість фоторезистора:

$$S_U = \frac{U_C}{\Phi} \cong \frac{U_{Ж} R_H b}{(R_T + R_H)^2}.$$

Таким чином, чутливість фоторезистора визначається не тільки його власними параметрами - крутістю характеристики S_U і темновим опором R_T , але і параметрами схеми підключення - напругою живлення $U_{Ж}$ і опором навантаження R_H .

При біляпорогових опроміненнях дуже важливо забезпечити найбільше відношення сигнал/шум, чи, що те ж саме, звести до мінімуму струм у колі під час відсутності опромінення. З цією метою опір навантаження R_H вибирається з умови:

$$R_H > R_\Phi \approx R_T.$$

Якщо ж необхідно виділити найбільшу потужність сигналу на виході, то вибирають:

$$R_H = R_T.$$

Величина R_T лежить у межах від 20 кОм до 1 МОм.

Основними видами власних шумів фоторезисторів є тепловий, дробовий і надлишковий. Для зниження рівня теплового шуму застосовується охолодження фоторезисторів. Зменшення дробового і надлишкового шумів досягається, звичайно, схемним методом.

У видимій області спектра основними є фоторезистори на основі CdS (сірчисто-кадмієві) і $CdSe$ (селенисто-кадмієві). Вони мають високий темновий опір ($10^7 \dots 10^{12}$ Ом) і відрізняються високою чутливістю. Завдяки високій квантовій ефективності фоторезистори здатні реєструвати світлові потоки аж до 10^{-11} лм.

Фоторезисторам притаманна лінійність у широкому діапазоні вхідних освітленостей. Сірчисто-кадмієві фоторезистори інерційні, їхня постійна часу лежить у межах від 1мс до 140мс.

Трохи меншу інерційність мають селенисто-кадмієві фоторезистори (0,5...20мс) [12].

Фоторезистори на основі *Pb*, *PbSe*, *InSb* застосовуються, головним чином, для роботи в інфрачервоній області спектра. Інерційність цих фоторезисторів менше (10^{-6} с при температурі $T=293^{\circ}\text{K}$). Однак при охолодженні цих фоторезисторів, а також при реєстрації випромінювань малих інтенсивностей інерційність збільшується.

Загальним недоліком усіх фоторезисторів є відносно велика інерційність, що різко звужує область їх застосування в системах космічної й авіаційної розвідки. Крім того, при прийомі випромінювань малих інтенсивностей, відношення сигнал/шум у фоторезисторів виявляється гірше, ніж у фотодіодів.

Фотодіоди. У цих напівпровідникових приймачів випромінювання фотоструму обумовлюється виникненням електронно-діркових пар при поглинанні випромінювання в області *p-n* - переходу й поділом їх електричним полем цього переходу.

Випромінювання звичайно направляється перпендикулярно площині *p-n*- переходу із боку напівпровідника *n*- типу. Напівпровідниковою структурою поглинаються ті фотони, що мають достатню енергію, інші фотони відбиваються. У результаті поглинання енергії створюються електронно-діркові пари (електрон - «дірка»), які далі під дією електричного поля переходу вони розділяються. На розімкнутих кінцях напівпровідникової структури з'являється фото-ЕРС. Якщо ж при цьому *p-n*- перехід замкнути на зовнішнє коло, то в колі потече струм. Описане явище, що носить назву фотогальванічного ефекту, і лежить в основі функціонування фотодіодів [20].

Залежно від схеми включення фотодіод може робити:

- 1) у фотогальванічному режимі, тобто в режимі генерування фото-ЕРС (рис. 3,57, *а*);
- 2) у фотодіодному режимі, коли на *p-n*-перехід подається зворотній зсув від додаткового джерела (рис. 3.57, *б*).

При включенні фотодіода у фотогальванічному режимі, струм у колі опроміненого фотодіода визначається виразом:

$$i = i_{\Phi} - i_{звор} \left[\exp\left(\frac{eiR_H}{k_B T}\right) - 1 \right],$$

де $i_{\Phi} = S_i \Phi$ - фотострум; $i_{звор}$ - зворотній струм фотодіода; e - заряд електрона; T - температура фотодіода. У фотогальванічному режимі темновий струм фотодіода дорівнює нулю, що є перевагою даного режиму.

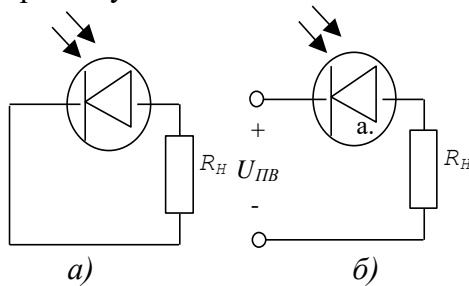


Рис.3.57. Схеми підключення фотодіодів

Максимальна величина фото-ЕРС у германієвих фотодіодів складає $\approx 0,14$ В, у кремнієвих фотодіодів - до 0,55 В.

Фотодіодний режим. Під час відсутності опромінення через фотодіод протікає темновий струм $i_T = i_{звор}$, величина якого залежить від температури і прикладеної напруги. При опроміненні фотодіода з'являється фотострум i_{Φ} , так що сумарний струм у колі $i = i_{\Phi} + i_{ОБР}$.

Розглянемо основні характеристики фотодіодів.

У фотодіодах найчастіше використовуються такі напівпровідники, як германій, кремній, антимонід індію *InSb*.

Криві відносної спектральної чутливості представлені на рис.3.58. Германієві і кремнієві фотодіоди зручні при реєстрації випромінювань видимої й ближньої інфрачервоної області.

Фотодіоди на основі антимоніду індію ефективні в середній і далекій інфрачервоній області спектра.

Граничні характеристики фотодіодів визначаються тепловим, дробовим і надлишковим шумом. При роботі фотодіода у

фотогальванічному режимі рівень шумів помітно менше, ніж при включенні його у фотодіодному режимі. Це дозволяє реєструвати потоки випромінювання аж до 10^{-12} Вт.

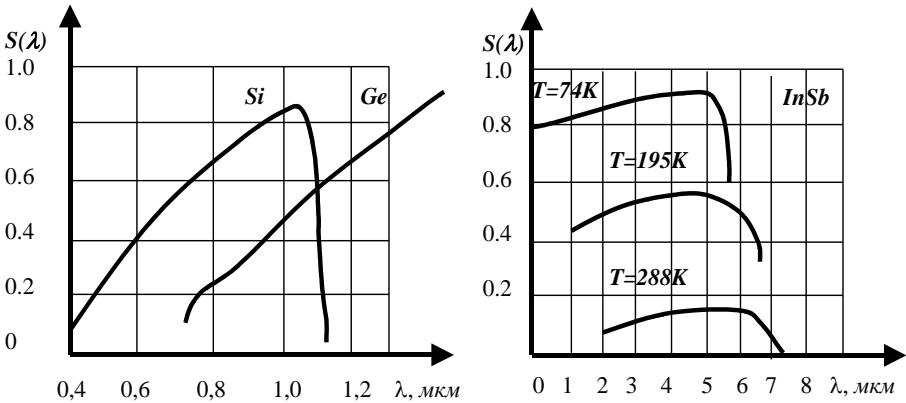


Рис.3.58. Криві відносної спектральної чутливості

Германієві і кремнієві фотодіоди здатні робити в умовах звичайних температур ($T \approx 300^0\text{K}$), фотодіоди *InSb* вимагають охолодження (звичайно до $T=77^0\text{K}$).

Статичні характеристики фотодіодів, використовуваних у фотодіодному режимі, практично лінійні. Іншою перевагою цього режиму є менша інерційність ($10^{-5} \dots 10^{-8}$ с). Причому, на відміну від фоторезисторів, інерційність фотодіодів не залежить від інтенсивності падаючого випромінювання.

У останні роки розроблені принципово нові типи фотодіодів - так названі *p-i-n* - фотодіоди і лавинні фотодіоди, які мають надзвичайно малу інерційність ($\approx 10^{-9} \dots 10^{-10}$ с) і високу чутливість (до 0,7 А/Вт поблизу довжини хвилі 0,9 μm) [25].

3.8.5. Формувачі відеосигналів

Найбільш широкого застосування набули формувачі відеосигналів на приладах з зарядовим зв'язком. У формувачах відеосигналів (ФВС) на основі приладів із зарядовим зв'язком

здійснюється перетворення світлового сигналу в електричний заряд.

Загальні принципи роботи ПЗЗ

Прилад з зарядовим зв'язком (ПЗЗ) являє собою (рис. 3.59,а) підкладку 4 з монокристалічного напівпровідникового матеріалу (кремнію) з провідністю n-типу. Підкладка покрита тонким ізолюючим шаром окисла 6, на який нанесені металеві електроди 1, 2, 3 [26].

При прикладанні до елементів напруги зсуву U_0 , на поверхні підкладки утвориться збіднений шар 5 (рис. 3.59, а).

Якщо тепер до одного з електродів, наприклад, до електрода 1, прикласти напругу U_1 , більшу (по абсолютній величині) за напругу зміщення U_0 , то збіднена область під цим електродом стане більш глибокою. Вона утворить потенційну яму для неосновних носіїв - позитивно заряджених дірок (рис. 3.59, б). Дірки, уведені яким-небудь образом у підкладку, зберуться в потенційній ямі під електродом.

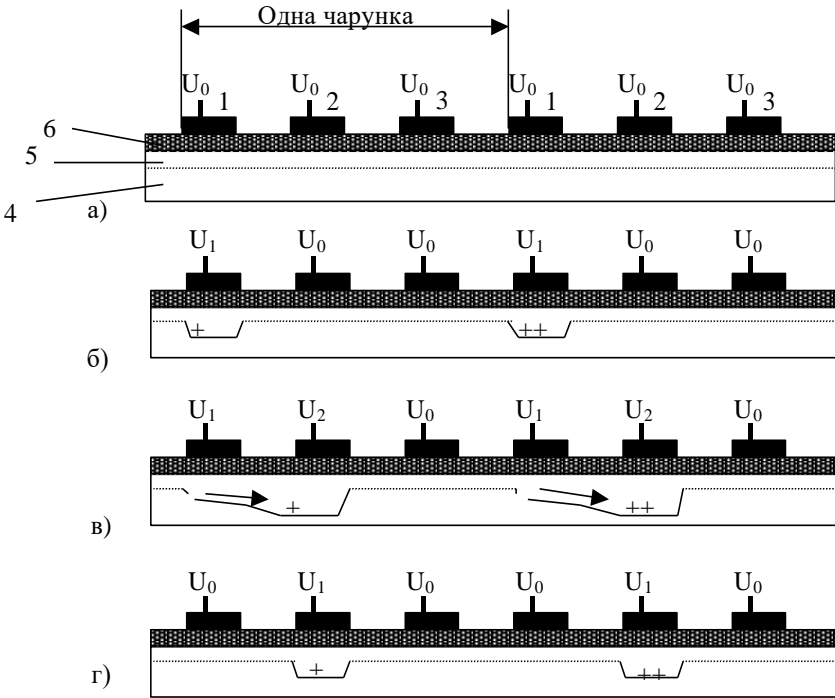


Рис.3.59. Прилад з зарядовим зв'язком

Для просторового обмеження збідненої області і потенційних ям ізолюючий шар окисла під електродами робиться більш товстим (на рисунку не показано).

Якщо тепер подати на сусідній електрод 2 негативну напругу U_2 , за абсолютною величиною перевищуючу напругу U_1 , то під ним утвориться ще більш глибока потенційна яма, і дірки перемістяться уздовж поверхні підкладки в потенційну яму під електродом 2 (див. рис. 3.59, в).

Після цього напруга U_1 на першому електроді може бути знижена до величини U_0 , а напруга U_2 на другому електроді - до U_1 . Це режим зберігання заряду (див. рис. 3.59, г).

Якщо тепер напругу U_2 прикласти до електрода 3, то дірки перемістяться в заново утворену потенційну яму, розташовану під ним.

Таким чином, використовуючи лише два значення напруги U_1 і U_2 , можна переміщувати дірки від одного електрода до іншого. Напругу U_1 називають напругою збереження інформації, а U_2 - напругою переносу. Типові значення цих напруг відповідно рівні 10 і 20 В (при нарузі зсуву $U_0=1\dots 2$ В) [20].

Запис інформації в ПЗЗ може бути здійснений шляхом накопичення в потенційній ямі заряду неосновних носіїв, генерованих під дією світла, що падає на напівпровідникову підкладку.

Зчитування інформації з ПЗЗ може здійснюватися по різному. Інформацію можна зчитати, вимірюючи струм, що протікає через $p-n$ - перехід, що знаходиться на виході ПЗЗ.

Принцип роботи ПЗЗ, заснований на переміщенні зарядів уздовж поверхні напівпровідника, у першу чергу, використовується при створенні реєстрів, що зсовують. Малий час переносу заряду від одного електрода до іншого відкриває можливості для побудови реєстрів, що працюють з тактовою частотою в декілька мегагерц.

Іншим напрямком використання ПЗЗ є створення приладів для перетворення зображень в електричні сигнали. У таких приладах на ізолюючий окисел наносять двовимірну сітку електродів. При подачі на електроди напруг у напівпровідниковому кристалі утвориться матриця потенційних ям. На протилежну поверхню кристала, вільну від електродів, проектується зображення. Генеровані світлом дірки збираються в найближчих до них потенційних ямах. Заряд, який накопичився в них, прямо пропорційний яскравості зображення на відповідній ділянці кристала.

Таким чином, у ПЗЗ просторовий розподіл інтенсивностей випромінювання перетворюється в рельєф електричних зарядів, який локалізується в приповерхній області напівпровідника. Зарядові пакети під впливом зміни керуючих напруг перетікають від однієї МДН-структури (метал-діелектрик-напівпровідник) до іншої і виводяться з приймача через вихідний електрод, утворюючи послідовність відеоімпульсів. Амплітуди відеоімпульсів адекватні розподілу інтенсивностей випромінювання вздовж лі-

нійки МДН-структур. Відеоімпульси далі підсилюються, для чого звичайно використовується МДН - підсилювач, розташований на одному кристалі з ПЗЗ.

Класифікація приймачів випромінювання на основі ПЗЗ

Приймачі випромінювання на основі ПЗЗ розрізняють за характером переносу заряду, типом тактового живлення, схемо-технічною організацією і спектральним діапазоном [26].

Залежно від характеру переносу носіїв (на поверхні або в об'ємі напівпровідника) ПЗЗ розділяють на прилади з поверхневим або прилади з об'ємним каналом переносу носіїв. Перевагами приладів з поверхневим каналом є простота конструкції й порівняно високе значення заряду, що переноситься. Однак ці прилади мають недостатньо високі швидкість та ефективність переносу зарядів. Ці обмеження в меншому ступені проявляються в ПЗЗ із об'ємним каналом (зі схованим каналом або перистальтичні ПЗЗ). У таких ПЗЗ канал переносу носіїв перебуває не на границі розмежування «окисел - кремній», а на деякій відстані від неї в об'ємі напівпровідника.

Збільшення ефективності переносу в ПЗЗ із об'ємним каналом викликано тією обставиною, що рекомбінація носіїв заряду в об'ємі напівпровідника протікає значно повільніше, ніж на його поверхні. Крім того, ПЗЗ із об'ємним каналом мають кращі частотні властивості, тому що рухливість носіїв в об'ємі напівпровідника більша, ніж на поверхні. Можна збільшити область робочих частот у конструкції перистальтичного ПЗЗ, якщо затвори перенесення розташувати симетрично із двох сторін пластини напівпровідника (рис. 3.60).

Прилади такого типу можуть працювати на частотах порядку гігагерц, тоді як ПЗЗ із поверхневим каналом перенесення функціонують у діапазоні менше 10 МГц.

За типом тактового живлення ПЗЗ можуть бути різними, однак найбільш широке застосування знайшли ПЗЗ із дво-, три- і чотиритактним живленням. З погляду простоти схем управління найзручнішими вважаються ПЗЗ із двотактним живленням.

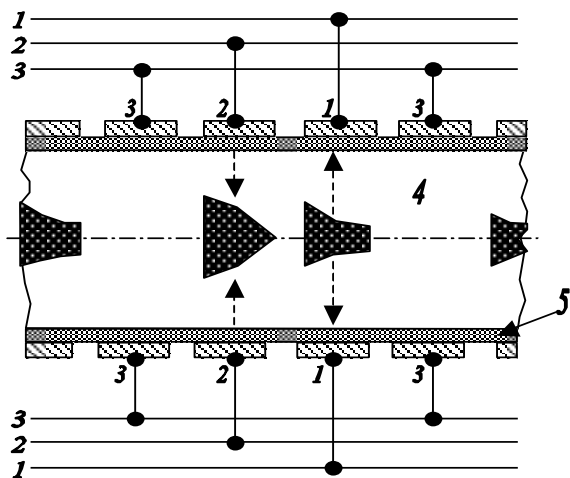


Рис.3.60. Конструкція перистальтичного ПЗЗ:
 1, 2, 3, - електроди перенесення; 4 - підкладка n-типу; 5 - плівка, штриховою лінією показаний згусток заряду і його переміщення від електрода 2 до електрода 3

Односпрямованість переносу носіїв заряду в цих приладах досягається різко несиметричним розподілом поверхневого потенціалу під передавальним електродом.

При використанні простих симетричних електродів потрібно щонайменше три тактових напруги, щоб створити спрямований переніс зарядів. Якщо під яким-небудь електродом зберігається заряд, то тільки на один з найближчих електродів може бути поданий високий потенціал, інший найближчий електрод повинен залишатися під низьким потенціалом, запобігаючи зворотному потоку заряду.

За схемотехнічною організацією ФВС діляться на лінійні - у яких елементи ПЗЗ розташовані уздовж однієї з координат (формують одновимірне зображення об'єкта), і матричні. У матричних ФВС по обох координатах здійснюється електронне самосканування.

Конструкції лінійних ФВС на основі ПЗЗ

У найпростішій конструкції лінійного ФВС, що являє собою зсувний реєстр із вихідним пристроєм, носії

накопичуються в каналі переносу (рис. 3.61, *a*). При цьому електроди переносу перебувають під постійним потенціалом, завдяки чому створюються ізолювані потенційні ями. Для зчитування на електроди подаються імпульси, які забезпечують дуже швидкий перенос заряду. У подібному лінійному ФВС критичний час накопичення зарядів скорочено за рахунок операції зчитування, що є недоліком.

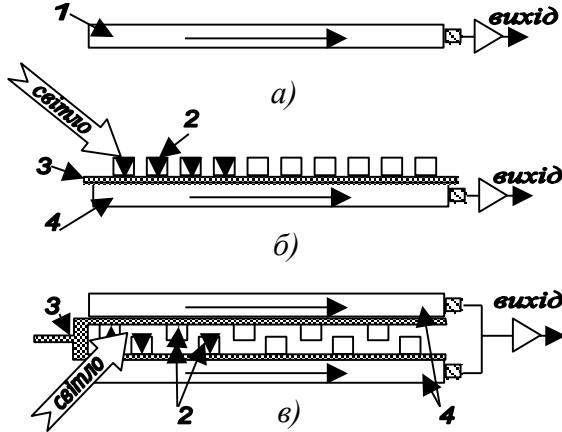


Рис. 3.61. Конструкція лінійного ФВС із одним зсувним регістром (*a*), окремими елементами накопичення (*б*) і двома зсувними регістрами (*в*): 1 - зсувний регістр; 2 - елементи накопичення; 3 - затвор переносу; 4 - екранований регістр, що зчитує

Створено лінійний ФВС, позбавлений цього недоліку (див. рис. 3.61, *б*). У такому ФВС окремі фоточутливі елементи ізолювані від регістра, що зчитує, роздільним затвором переносу, а з трьох інших боків - стоп-каналами. Після того, як процес накопичення закінчився, на роздільний затвор подається зсув, що збіднює. Всі зарядові пакети паралельно переносяться в екранований регістр, що зчитує. У регістрі чарунки переносу розташовані напроти кожного фоточутливого елемента. Поки триває наступний період накопичення, регістр просуває на вихід зарядові пакети, що надійшли у нього. У цьому випадку період накопи

чення стає практично рівним часу циклу (накопичення - зчитування), отже характеристики переносу поліпшуються.

Частота роботи зсувного реєстра, що зчитує, значно знижена в лінійних ФВС із двома зсувними реєстрами, розташованими з обох сторін фоточутливих елементів (див. рис.3.61, в).

Після того як закінчився процес накопичення, відкриваються роздільні затвори, зарядові пакети переносяться в зсувні реєстри й зчитуються по черзі за наступний період накопичення. Основною перевагою дворегістрового ФВС перед однорегістровим є збільшене значення результуючої ефективності переносу, тому що число переносів зменшується удвічі.

Конструкції матричних ФВС на основі ПЗЗ

У матричних ФВС може здійснюватися або послідовний перенос зарядів, або координатна вибірка – в так званих приладах з інжекцією заряду (ПЗІ) [26]. Матричні ФВС із послідовним переносом зарядів можуть мати як розділені, так і нерозділені області накопичення й переносу. Поділ областей здійснюється двома основними способами: з переносом кадру в область зберігання та зі стрічково-кадровим міжрядковим переносом (рис.3.62, а, б).

У матрицях з переносом кадру половина фоточутливих елементів захищена від світла і утворює область зберігання (пам'яті). У фоточутливій області відбувається накопичення оптичної інформації як зазвичай протягом напівкадру. По закінченні періоду накопичення відбувається паралельний зсув накопичених зарядів в область пам'яті. Для зменшення змазування зображення при зсуві час переносу повинен бути істотно меншим періоду накопичення. Протягом наступного напівкадру у фоточутливій області, що звільнилася, іде накопичення, а в області зберігання відбувається порядковий паралельний перенос зарядових пакетів у реєстр і потім послідовне виведення рядка (рис. 3.62, а).

На рисунку позначено: 1-фоточутлива область; 2-область зберігання; 3-вихідний реєстр; 4-канали переносу; 5-вихідний діод; 6-фоточутливі елементи накопичення; 7-вертикальні зсувні

реєстри; 8-освітлювані канали переносу; 9-генератор вертикального розгорнення; 10-екранований вихідний реєстр.

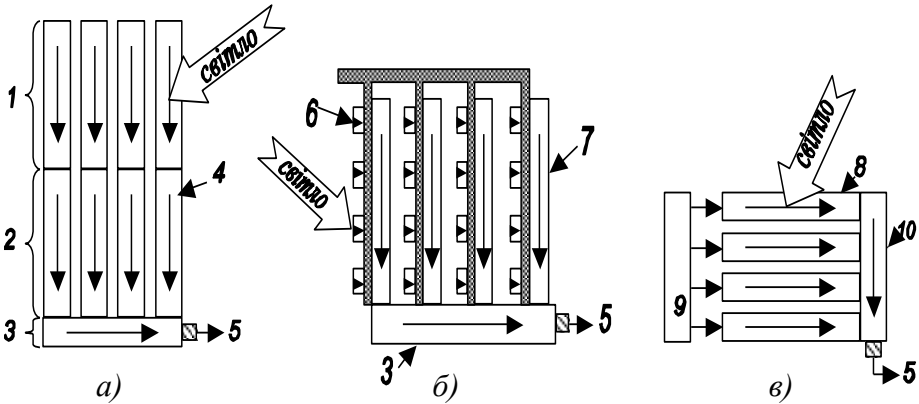


Рис. 3.62. Конструкція матричного ФВС із переносом кадру (а), з рядково-кадровим переносом (б) і з часовою затримкою й накопиченням (в)

У матрицях з рядково-кадровим переносом область накопичення складається з вертикальних стовпців, між якими вставлені захищені від світла вертикальні зсувні реєстри (див. рис. 3.62, б). Заряди у фоточутливих елементах накопичуються протягом кадру і потім паралельно переносяться в сусідні чарунки зсувних реєстрів. За час накопичення зарядів наступного кадру у фоточутливих елементах зарядові пакети зі зсувних реєстрів виносяться у вихідний реєстр і вихідний пристрій.

Матричними ФВС із послідовним переносом зарядів, що мають регулярну структуру без поділу областей накопичення й переносу, є матриці з часовою затримкою й накопиченням (ЧЗН). Матриця ЧЗН складається з багатьох лінійних формувачів, які поєднуються за допомогою реєстра у двовимірний набір (див. рис. 3.62, в). У режимі ЧЗН необхідною умовою функціонування є переміщення матриці або об'єкта відносно один

одного в напрямку, перпендикулярному рядкам. У цьому випадку зсув накопичуваних зарядів за кадровим напрямком збігається за напрямком і швидкістю з переміщенням проєкції оптичного зображення, яке рухається відносно приймача. Накопичення відбувається в тих самих зарядових пакетах, але в просторово-різних елементах матриці. Це дозволяє реалізувати більший час накопичення при відсутності змазування зображення.

З кожного рядка, який перемикається за допомогою генератора вертикального розгорнення, заряд передається в екранований вихідний регістр. Складність такої організації зчитування полягає в тому, що зчитування кожного рядка повинне відбуватися з відповідною затримкою, щоб компенсувати різну величину затримки у вихідному регістрі.

Використання часової затримки й накопичення дозволяє різко збільшити відношення сигнал/шум матриць ЧЗН (пропорційно квадратному кореню із часу накопичення) і, отже, реалізувати високу чутливість. Матриці ЧЗН вигідно відрізняються від інших матричних ФВС тим, що їх можна об'єднати в гібридні системи, нарощуючи число елементів розкладання по рядку.

У приладах із зарядовою інжекцією (ПЗІ), на відміну від ПЗЗ, перенос заряду відбувається лише між електродами в кожній окремій їхній парі без зсуву всіх зарядових пакетів до одного загального виходу [25].

Основу ПЗІ становить матриця з координатною вибіркою, у кожній чарунці якої є два суміжних МОН-конденсатора (рис. 3.63). Один з них приєднаний до стовпчикової шини, інший - до рядкової. Шини управляються регістрами горизонтального й вертикального розгорнення.

За період накопичення фотогенеровані неосновні носії збираються в чарунках рядкових шин, на які подана зсувна напруга, що збіднює. Перед початком зчитування вертикальні шини і пов'язані з ними електроди заряджаються від опорного джерела і відключаються від нього за допомогою ключів $K1$ - $K4$. Горизонтальні шини перебувають під потенціалом більш високим, ніж

U_{on} . Для зчитування обраного рядка за допомогою зсувного ре

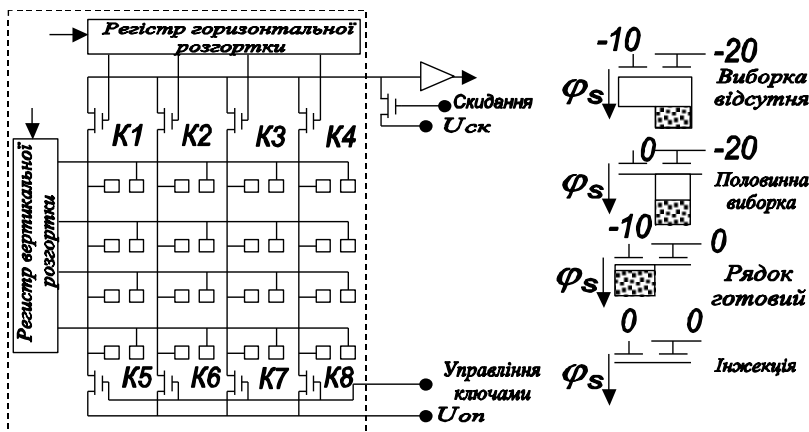


Рис. 3.63. Прилад із зарядовою інжекцією

гістра напруга на рядку скидається, заряди зсовуються під електроди, пов'язані з вертикальними шинами. Потенціали вертикальних шин змінюються залежно від величини зарядових пакетів, що перейшли, і по черзі підключаються до вихідного пристрою за допомогою ключів $K5-K8$ і регістра розгорнення. Для підготовки приладу до наступного такту роботи одночасно на обидва електроди подається нульова напруга зсуву, потенційна яма «закривається» і неосновні носії інжектуються в підкладку, де рекомбінують. Можливий режим неруйнуючого зчитування, коли пакети знову повертаються в МОН- конденсатори рядкових шин.

Неруйнуюче зчитування сигналу в ПЗІ дозволяє одержати високу чутливість при малих освітленостях. Після N процесів неруйнуючого зчитування шум зменшується в \sqrt{N} разів, що дозволяє досягти рівня шумів у 55 електронів.

Кожен фоточутливий елемент ПЗІ оточений з усіх боків стоп-каналною областю, що дозволяє ефективно запобігати розтіканню зарядів. ПЗІ може нормально працювати при 1000-кратних локальних засвітленнях. До недоліків ПЗІ відноситься

більша ємність стовпців, що ускладнює завдання детектування елементів зарядів, які надходять з підрядків.

Основні параметри і характеристики ФВС на ПЗЗ

Особливістю ФВС, основаних на ПЗЗ, є їх багатофункціональність, крім фотоелектричного перетворення здійснюються накопичення, затримка й комутація сигналу. ФВС на ПЗЗ мають такі особливості: малу інерційність; низький рівень шумів; високу лінійність фотоелектричного перетворення; малий розмір і масу приладу; низьку напругу живлення й малу споживану потужність; високу стійкість до механічних, акустичних й електромагнітних впливів; високу надійність і довговічність; широкі функціональні можливості [26].

Виділяють три групи параметрів, що характеризують властивості ПЗЗ у прийомі-передачі зображень: електричні, геометричні й просторово-передатні. Деякі параметри показані в таблиці 3.5.

До основних характеристик ФВС відносяться спектральна й частотно-контрастна чутливість. Одним з основних факторів, що визначають спектральну чутливість, є інтенсивність поглинання фотонів, яка залежить від довжини хвилі λ . Внаслідок цього для конкретного напівпровідника ланка довжин хвиль, у якій здійснюється ефективне перетворення світлового потоку в інформаційний сигнал, обмежена. Довгохвильова межа визначається шириною забороненої зони напівпровідника й дорівнює приблизно 1,7 мкм для германія й 1,1 мкм для кремнію.

За значенням спектральної чутливості, обумовленої як відношення збільшення струму на виході матриці до збільшення потоку випромінювання, можна знайти значення квантової ефективності η шляхом ділення струму на заряд електрона і потоку випромінювання на енергію кванта.

Можливий і зворотний перехід від η до $S(\lambda)$. Якщо $S(\lambda)$ вимірюється в міліамперах на ватт, а довжина хвилі λ - у нанометрах, то при $\eta=1$, $S(\lambda)=\lambda/1,24$.

Спектральна характеристика чутливості (у відносних одиницях) матриці ПЗЗ розміром 580×532 елементів показана на рис. 3.64 [25].

Таблиця 3.5

Параметри ПЗЗ

Найменування	Розрахункова формула	Значення	Визначення
1	2	3	4
Ширина елемента z , мкм	-	8-100	-
Довжина елемента l_e , мкм	-	8-100	-
Зазор між елементами δ , мкм	-	2-25	-
Довжина чарунки l_y , мкм	$l_y = (2...4)(l_e + \delta)$	8-125	-
Число елементів N	-	$10-10^6$	-

Питома роздільна здатність $R_{y\partial}$, ліній/мм	$R_{y\partial} = \frac{1}{l_y}$	20-30	Число елементів розкладання на міліметр чутливої поверхні при 20%-ній модуляції сигналу

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
Роздільна здатність R , число ліній	$R = R_{y\partial} l_{cmp}$	600-1000	Число елементів розкладання, що доводяться на довжину рядка
Ефективність переносу заряду η_n	-	0,9999	Здатність підтримувати цілісність заряду за один перенос пакета від електрода до електрода
Максимальна частота роботи ПЗЗ f_{max} , МГц	-	10-25	Максимальна частота виведення зарядового пакета з однієї чарунки
Квантовий вихід (квантова ефективність),	$\eta = \frac{n_{\phi\partial}}{n}$	-	Відношення числа фотоелектронів

η			до числа падаючих на чутливу поверхню квантів
Коефіцієнт використання k	$k = \frac{\int_0^{\infty} E_{\lambda_{omn}} S_{\lambda_{omn}} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda_{omn}} d\lambda}$	0,3	Коефіцієнт використання ПЗЗ для даного випромінювача

Закінчення табл. 3.5

1	2	3	4
Інтегральна чутливість S_{int} , Кл/Дж(А/Вт)	$S_{int} = S_{\lambda_{max}} k$	0,005-0,2	Відношення сигнального заряду до енергії, отриманої приймачем за час накопичення
Динамічний діапазон D	$D = \hat{O}_{max} / \hat{O}_{min}$	$(1-5) \times 10^3$	Діапазон опромінення, що може бути переданий без перекручувань
Граничний потік (поріг чутливості) $\Phi_{пор}$, Вт	$\Phi_{пор} = J_u / S_{int} = N_u q / S_{int} t_i$	10^{-12} - 10^{-15}	Мінімальне значення потоку випромінювання, що викликає на виході ПЗЗ сигнал, який дорівнює значенню шуму

Виявляльна здатність D^* , $\text{см} \cdot \sqrt{\text{Гц}} / \text{Вт}$	$D^* = 1 / \Phi_{\text{пор}}^*$	$10^8 - 10^{12}$	Величина, зворотна питомому граничному потоку
--	---------------------------------	------------------	---

Чутливість ПЗЗ складає одиниці міліамперів/люмен, тобто порівняно з чутливістю звичайних кремнієвих фотодіодів.

ПЗЗ здатні реєструвати опромінення до 10^{-5} Вт/м² і освітленості в діапазоні від 0,1 до 300 лк. При використанні ПЗЗ для форму

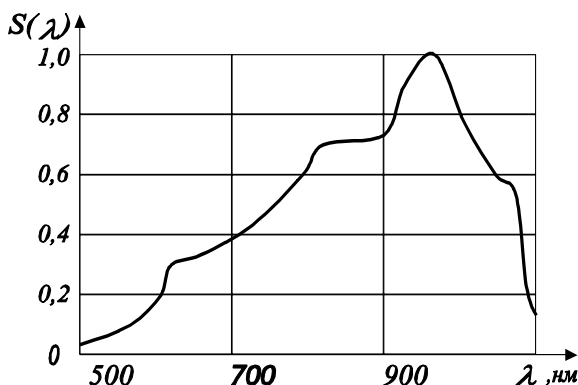


Рис. 3.64. Спектральна характеристика чутливості матриці ПЗЗ

вання зображення, граничне значення експозиції складає близько 10^{-4} лк·с (при відношенні сигнал/шум, рівному 2). Граничні властивості ПЗЗ обмежені переважно шумами, зв'язаними з передачею і посиленням зарядових пакетів, а також радіаційним шумом випромінювання.

Роздільна здатність ПЗЗ визначається розмірами однієї ланки, що складається з трьох електродів і розташованих між

ними чуттєвих площадок. Мінімальні розміри електрода й однієї чуттєвої площадки окремо можуть бути близько 1,5 мкм. Вважаючи, що й електрод, і площадка мають однаковий лінійний розмір (1,5 мкм), знаходимо, що максимально можлива роздільна здатність ПЗЗ

$$R_{ПЗЗ} = \frac{1}{3(1,5 + 1,5) \cdot 10^{-3}} \approx 100 \text{ мм}^{-1}.$$

Однак на практиці роздільна здатність ПЗЗ виявляється трохи нижче і не перевищує 50-80 мм⁻¹. Кремнієві ПЗЗ чуттєві в області довжин хвиль $\lambda = 0,5 \dots 1,1$ мкм. Для роботи в інфрачервоній області спектра застосовуються ПЗЗ на основі *InSb*, *HgCdTe*, *PbTe* й інших напівпровідників.

Дуже важливим параметром є *середнє квадратичне відхилення (СКВ) шумів на виході оптичного приймача на ПЗЗ*. Якщо за оптичний приймач застосовується лінійний (матричний) приймач на ПЗЗ, то на його виході оптичний сигнал буде (після АЦП) у цифровому вигляді. При дискретизації та квантуванні сигналів виникають помилки, точний аналіз яких складний. При великій розрядності приймача точна модель помилок замінюється статистичною.

Крім того, приймач має свої внутрішні шуми, які незалежні з помилками квантування. У цьому випадку загальна дисперсія шумів знаходиться за формулою

$$\sigma_{заг}^2 = \sigma_{ш.кв}^2 + \sigma_{вн}^2,$$

де

$$\sigma_{ш.кв}^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{2B+1} \right)^2; \sigma_{вн}^2 = \frac{1}{9} \left(2^{2(K-1)} \right),$$

де *D* - динамічний діапазон сигналу, *B* - розрядність АЦП оптичного приймача, *K* - число розрядів, що перекриваються шумами.

Даний шум представляє собою білий шум із нормальним розподілом щільності ймовірності. Спектральну щільність потужності можна розрахувати за формулою

$$N_{ш} = \frac{2\sigma_{заг}^2}{\Delta f},$$

де Δf - ширина смуги перепускання оптичного приймача.

У даний час розроблені лінійки ПЗЗ, що містять до 12000 елементарних МДН-структур і матриці ПЗЗ із розмірністю до 2048x1024 елементів. Габаритні розміри таких ПЗЗ складають близько 5×10×8 мм [25].

Організація приладів за принципом зарядового зв'язку забезпечує можливість зчитування масиву електричних сигналів, що відповідають сцені зображення з мінімальними геометричними і часовими шумами. Застосування ПЗЗ, що працюють у режимі накопичення, істотно поліпшило стан справ в області видимого й інфрачервоного діапазонів. Датчики зображень на основі ПЗЗ можуть забезпечувати одночасне виконання ряду функцій, таких, як детектування, зчитування і мультиплексування сигналу, а також його обробку в режимі ЧЗН [13].

Перерахунок діючих експозицій у напруги на виході ПЗЗ структури

Обов'язковими елементами схем на ПЗЗ є елементи запису і зчитування, які здійснюють ввід та вивід інформації, і елементи регенерації, які встановлюють погіршені (після декількох десятків тисяч переносів) інформаційні стани. Ці елементи в значній мірі визначають характеристики пристроїв на ПЗЗ. Так чутливість елемента зчитування визначає мінімальну величину зарядового пакета, а поновлювальна властивість елемента регенерації – кількість ПЗЗ, скрізь які інформація може бути передана без відновлення тощо [26].

ПЗЗ елементи у оптичному приймачі працюють у трьох режимах: сприйняття (інтегрування) зображення, тобто перетворення світлового потоку у зарядові пакети; збереження зарядових пакетів; передача (сканування) зарядових пакетів на вихід пристрою. У режимі сприйняття зображень світловий потік від об'єкта падає на поверхню формувача сигналів зображення (ФСЗ) і викликає генерацію електронно-діркових пар у напівпровідниковій підкладці.

У областях кристала, що відповідають потенціальним ямам ПЗЗ, носії розподіляються, у результаті чого у ФСЗ накопичується картина зарядових пакетів, яка відповідає образу, що сприймається.

Способи зчитування інформації на ПЗЗ базуються на перетворенні величини інформаційного заряду у зміну вихідної напруги чи струму. Існує два основних методи виміру заряду пакета носіїв у ПЗЗ-регістрі. Перший метод полягає у переносі пакета до $p-n$ діода, що зчитує. Струм потім може зчитуватися струмовим передпосилувачем, як показано на рис. 3.66, *а* (R - опір зворотного зв'язку, B - фільтр нижніх частот). Другий метод полягає в інжекції заряду під плаваючий затвор, напруга на якому встановлена рівною опорній, послідовному виміру різниці напруг, що викликається зарядом на вході передпосилувача, який переноситься, як показано на рис. 3.66, *б* (перед переносом сигнального заряду під затвор G напруга на затворі встановлюється до значення V_{on} замиканням і розмиканням ключа S_1). Обидва методи дозволяють проводити одночасне зчитування з деяких ланок одного і того ж кристала.

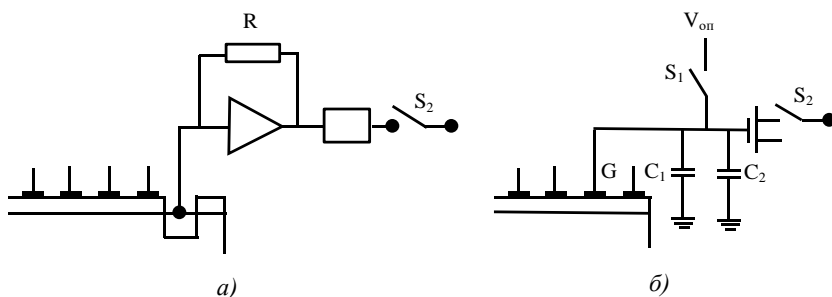


Рис. 3.66. Пристрої зчитування з ПЗЗ

Перевагою використання зчитуючого $p-n$ діода зі струмовим передпосилувачем є більш широкий динамічний діапазон, тому що діод малих розмірів може обробляти великий заряд, а через відсутність операції скидання не буде проявлятися кТС-шум. Таку схему важко реалізувати в інтегральному виконанні, оскільки до фотоприймального вузла необхідно підключати високоомний опір зворотного зв'язку. Зчитуючий $p-n$ діод при

зворотному зміщенні можливо також використовувати із зчитуючим передпідсилювачем напруги. Такий метод (із використанням передпідсилювача з плаваючим затвором) значно простіше реалізується при інтегральному використанні схеми (на вході передпідсилювача не потрібно конденсатора).

У цьому випадку для обробки максимальних сигналів площа плаваючого затвора чи p - n переходу повинна бути порівняна з розміром потенціальної ями ПЗЗ. Обидва методи зчитування напруги характеризуються кТС-шумом, причиною якого є скидання напруги між вибірками через опір з тепловим шумом. Але, кТС-шум можливо подавити за допомогою подвійної корельованої вибірки. Метод передпідсилювача з плаваючим затвором дозволяє проводити незруйнований процес зчитування, тому що той же зарядовий пакет може оброблятися багаторазово при своєму русі вздовж ПЗЗ-регістра, як в ускладненому розподіленому посилювачі з плаваючими затворами (РППЗ). Повторне зчитування в РППЗ приводить до когерентного складання сигналу і до некогерентного складання шуму, внаслідок чого збільшується відношення сигнал-шум пропорційно кореню квадратному із числа каскадів.

Якщо не враховувати кТС-шум, то перенос заряду носіїв

$$E(x, y) = \frac{Q_s(x, y)}{(C_1 + C_2)},$$

де Q_s підплаваючий затвор приводить до зміни напруги на ньому:

$$Q_s(x, y) = E_{eum}(x, y) \exp(-\alpha x) \theta_i A_e,$$

де θ - квантова ефективність, α - коефіцієнт поглинання, t_n - час накопичення, x - глибина напівпровідника до збідненого шару.

В таблиці 3.6. приведені основні параметри і характеристики ПЗЗ, які найбільш часто застосовуються.

3.12. Багатозональне знімання

Слабкі і сильні сторони космічного знімання завжди враховувалися при проведенні маскувальних заходів. Щоб сховати від розвідки склад та побудову сил чи створити неправильне уявлення про них, широко застосовується цілий комплекс засобів маскування (маскувальні покриття і сітки, дим й аерозолі, макети й імітаційна техніка). Наприклад, щоб зробити менш помітними аеродроми, на них імітуються дороги, посіви, під фон місцевості фарбуються злітно-посадочні смуги, доріжки і різні аеродромні споруди. Наприклад, на авіабазі ВПС США Хан (Німеччина) у захисні кольори пофарбовано близько 400000 м² поверхні. Літаки на аеродромах і посадкових площадках

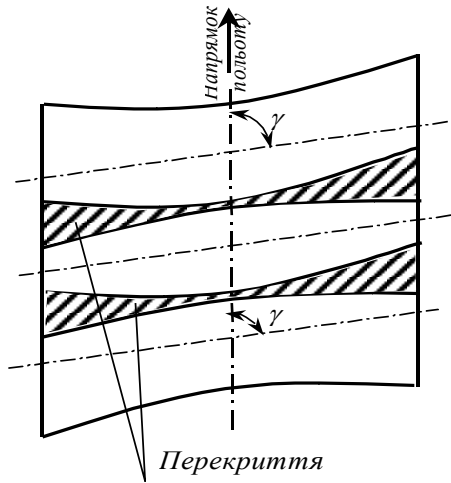


Рис. 3.96. Перекриття при панорамному фотографуванні

розташовуються розосереджено. Вони камуфлюються під фон місцевості, ховаються під кронами дерев, покриваються спеціальними маскувальними сітками. Командні пункти, бойова

техніка й особовий склад розміщуються в замаскованих укриттях.

У міру того, як усе більш ретельно проводиться маскуван-ня військ і військових об'єктів, виникає таке положення: багато реальних об'єктів не можна побачити людським оком і розпізна-ти на знімках, а хибні споруди і макети відрізнити від дійсних. При правильному використанні засобів маскуванн-ня обсяг інфо-рмації як чорно-білого, так і кольорового знімка виявляється недостатнім. Застосування панхроматичного знімання принци-пово не може забезпечити гарного виявлення всіх елементів ландшафту.

При панхроматичному зніманні фотоприймач є чуттєвим до усіх променів видимої зони спектра, тобто ніби то виміряєть-ся відносна яскравість об'єктів у широкому діапазоні довжин хвиль (0,4 - 0,8 мкм). При цьому об'єкти, що мають однакову ін-тегральну яскравість, але різну кольоровість, наприклад, із синім чи з червоним відтінком, нерозрізнені.

Для розкриття замаскованих цілей розроблені нові види космічного знімання – спектрозональні, багатозональні і гіперс-пектральні [17].

Вони полягають у проведенні знімання одночасно в декі-лькох зонах спектра, у результаті отримується якісно нова, у порівнянні зі звичайним панхроматичним зніманням, інформа-ція.

3.12.1. Особливості зображень інфрачервоного діапазону

ІЧ системи в порівнянні з оптико-електронними системами видимого діапазону мають особливості, що полягають у наступ-ному.

1. Для виявлення і розпізнавання об'єкта ІЧ системою об'єкт повинний відрізнитися від фону за температурою чи кое-фіцієнтом випромінювання на достатню величину, яка дозволила б відокремити його від інших варіацій фону.

2. ІЧ системи здатні працювати в будь-який час доби, вдень і вночі, за рахунок власного випромінювання.

3. ІЧ системи дозволяють розкривати замасковані у видимому діапазоні довжин хвиль об'єкти.

4. ІЧ системи забезпечують одержання високих значень контрасту об'єктів і фонів у ІЧ діапазоні.

5. На відміну від зображення у видимому діапазоні довжин хвиль ІЧ зображення практично не має тіней. У результаті просторове сприйняття об'єктів на ІЧ знімках гірше, ніж на знімках видимого діапазону.

6. Яскраво відтворені на знімках видимого діапазону об'єкти на ІЧ знімках можуть виявитися темними, тому що на ІЧ знімках відтворюється не яскравіший, а тепловий контраст елементів.

7. ІЧ системи дозволяють одержувати додаткову інформацію і дешифрувальні ознаки в порівнянні з системами видимого діапазону. ІЧ системи, наприклад, дозволяють визначати рівень рідини в цистерні, виявляти кільватерний слід морських судів, недавно виключені двигуни, промислові підприємства по випромінюванню нагрітих площ і гарячих газів, забезпечувати розпізнавання об'єктів по картині нагрівання елементів поверхні тощо.

Оптико-електронні системи космічної розвідки, що забезпечують можливість спостереження розігрітих об'єктів в інфрачервоній (ІЧ) області електромагнітного спектра, називаються інфрачервоними чи тепловими. Видиме зображення, одержуване при цьому, є аналогом інфрачервоного (теплого) і тому називається також інфрачервоним чи тепловим.

Інфрачервоне випромінювання земної поверхні й атмосфери неодноразово вимірялося за допомогою апаратури, установлені на супутниках, а також розраховувалося теоретично. Дослідження показали, що енергетична яскравість освітленої Сонцем сторони Землі, що може спостерігатися із супутників, а також енергетична яскравість відбитого сонячного світла від хмар різних ярусів і снігу залежать від довжини хвилі і температури випромінюючої поверхні (рис.3.97, 3.98).

Пунктиром показана відносна яскравість теплового випромінювання абсолютно чорного тіла: 1 - при $T=300\text{K}$; 2 - при $T=200\text{K}$.

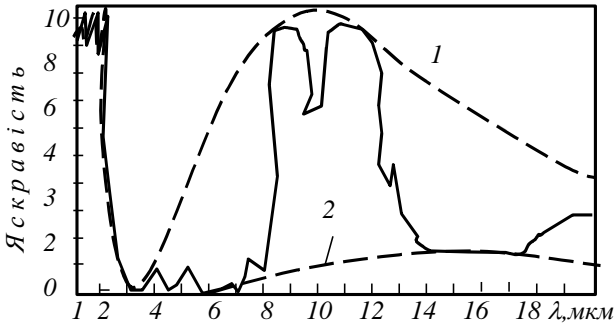


Рис.3.97. Відносна яскравість відбитого сонячного і власного теплового випромінювання Землі в космос в інфрачервоному діапазоні хвиль

При довжині хвилі менше 3 мкм ІЧ випромінювання залежить від кількості розсіяного сонячного світла, на яку, у свою чергу, впливає природа земної поверхні та наявність хмарності. У цьому діапазоні необхідно враховувати ймовірну наявність дзеркальної складової від поверхні океанів, що займають велику частину площі Землі.

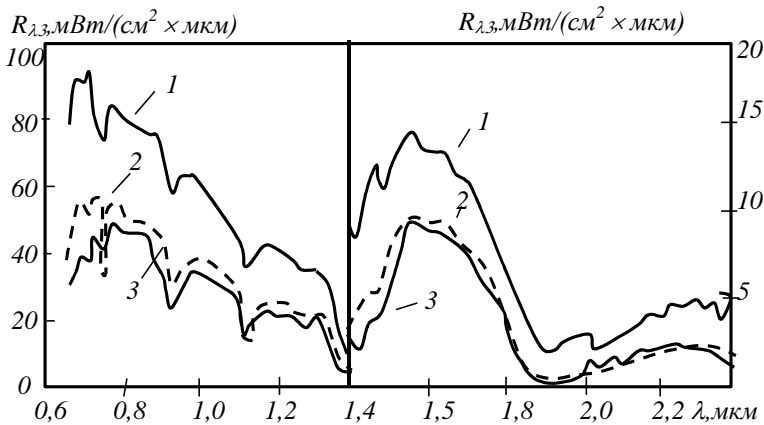


Рис.3.98. Спектральна енергетична світимість:
 1 - пір'ясто-шаруваті хмари на висоті 8,2 км; 2 - пір'ясті хмари на висоті 12,8 км; 3 - сніжні покритви на Землі

У області довжин хвиль більше 4 мкм розсіяне сонячне світло стає дуже малим у порівнянні з власним випромінюванням атмосфери і поверхні Землі. Поверхня хмар випромінюється як чорне тіло при температурі хмар. У атмосферних вікнах яскравість відповідає випромінюванню чорного тіла при температурі земної поверхні, а в смугах поглинання - випромінюванню чорного тіла при температурах стратосфери.

У інфрачервоних оптико-електронних системах видової розвідки (ОЕСВР) невидиме оком людини власне ІЧ випромінювання об'єкта і відбите від нього ІЧ випромінювання інших джерел перетворюється в електричний сигнал, що піддається посиленню й автоматичній обробці, а потім перетворюється у видиме зображення об'єкта, що надалі реєструється і розпізнається дешифрувальником.

На відміну від зображень у видимій області спектра, інфрачервоні зображення створюються, головним чином, за рахунок власного випромінювання об'єктів. У загальному випадку потік випромінювання від об'єкта визначається спільною дією температури T об'єкта, відбивною і випромінювальною

здатністю його поверхні, які характеризуються коефіцієнтами яскравості й енергетичною світимістю.

Можливість розпізнавання об'єктів на ІЧ знімку визначається величиною ефективної температури елементів земної поверхні. Зміна ефективної температури елементів поверхні у визначеній мірі відповідає деталям картини, що візуально спостерігається. Тому створений ІЧ системою видимий аналог інфрачервоного зображення звичайно відповідає нашим уявленням про форму і розміри елементів земної поверхні, але ІЧ зображення несе в собі додаткову інформацію про об'єкти.

Головна особливість ІЧ систем полягає в можливості реєстрації власного електромагнітного випромінювання слабо нагрітих об'єктів. Таким чином, ІЧ системи призначені для одержання в нічних і денних умовах ІЧ знімків, на яких можуть бути розпізнані різні замасковані об'єкти.

3.12.2. Багатозональні знімки

При зніманні в областях спектра, що відповідають чутливості зорових рецепторів людського ока - синій, зеленій і червоній, отримується кольорове зображення об'єкта в природних кольорах. За цим принципом побудована вся звичайна кольорова фотографія, що є аналогом триколірного людського зору і за своїми інформаційними характеристиками приблизно йому відповідає. Однак різке збільшення яскравості живих рослин в інфрачервоних променях оптичного спектра послужило приводом до появи спектрозональних методів знімання, при яких один із фотоприймачів датчика зображення сприймає інфрачервоне випромінювання. Практика показала, що в більшості випадків спектрозональне знімання для дешифрування ефективніше звичайного кольорового.

Спектрозональне знімання - це знімання земної поверхні одночасно в різних спектральних зонах.

Знімання земної поверхні в чотирьох і більше спектральних зонах називається багатозональним зніманням.

При спектрозональному зніманні одержуване багатоколірне зображення є зображенням не в реальних, а в умовних кольорах. Передача кольору зображень в окремих спектральних ділянках повинна лише забезпечувати максимум колірної контрасту, а правильність її може бути порушена.

Традиційний вибір зон спектральної чутливості для багатозонального знімання полягає у визначенні яскравісних (r_λ - спектральний коефіцієнт яскравості) і контрастних (K_λ - спектральний контраст) розходжень для різних довжин хвиль [17]. Як видно з рис. 3.99, співвідношення яскравості листяних насаджень у літній період, трав'яних покривів з густою рослинністю (крива 1) і зеленою маскувальною сіткою (крива 2) змінюється для різних довжин хвиль. Рослинність відрізняється підвищенням яскравості в зеленій області (0,55 мкм) і різким збільшенням за 0,7 мкм. При цьому контраст може змінювати знак на протилежний. При зніманні в широкій області спектра ці розходження усереднюються і згладжуються. Зони протилежних контрастів повинні бути реалізовані в різних каналах (при адитивному способі багатозонального знімання). Таким чином, можна досить ефективно вибрати оптимальні характеристики для окремих конкретних задач при заданих спектральних яскравостях об'єктів і фону.

Для спектрозонального знімання сучасними оптикоелектронними засобами використовується адитивний спосіб. Він припускає одночасне знімання в декількох зонах спектра. Поділ зон спектра здійснюється або застосуванням звичайного дисперсійного фільтра (для фіксації на широкодіапазонних фотоприймачах одного датчика), або застосуванням фотоприймачів з вузькими зонами спектральної чутливості в різних датчиках. Синтез кольорового і кольорокодованого зображень здійснюється з застосуванням ЕОМ на автоматизованих робочих місцях обробки. Такий спосіб одержання кольорового зображення був названий адитивним через операцію додавання зображень, одержуваних у різних зонах спектра.

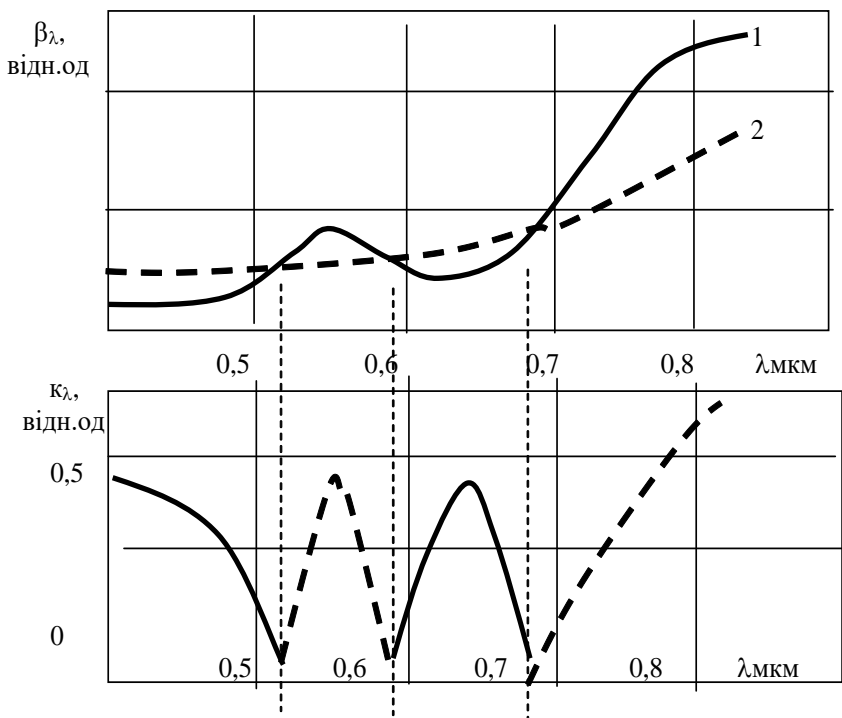


Рис. 3.99. Спектральні характеристики об'єктів і їхні спектральні контрасти

Після спектрозонального знімання на два приймачі (один чуттєвий до видимої області спектра, а другий - до інфрачервоної) і наступного кольоросинтезованого сполучення виходить кольоророздільне зображення. Зображення видимої діпазону представляється в градаціях яскравості одного кольору (наприклад, синього), а зображення ІЧ діпазону в градаціях іншого кольору, найбільш кольороконтрастного до першого (наприклад, жовтого).

Таке знімання дуже інформативне для розпізнавання технічних об'єктів (бронетанкової техніки, будівель тощо), пофарбованих у маскувальний колір, на фоні природного фарбування місцевості. У видимій області спектра маскувальне фарбування і фарбування місцевості мають приблизно однакові спектральні характеристики яскравості. У ближній ІЧ області

штучні об'єкти, якщо їхня температура вище, мають значно більше власне випромінювання, ніж природні, і виглядають на їхньому фоні контрастно.

При спектросональному фотографуванні зображення місцевості виходить у незвичних для ока контрастах. Змінюються форми об'єктів, прийняті за дешифрувальні ознаки. Щоб спектросональне знімання було більш ефективним, необхідно знати спектральні коефіцієнти яскравості всіх цікавлячих елементів місцевості, штучних об'єктів і об'єктів розвідки.

Одночасне знімання в різних і досить вузьких спектральних діапазонах дозволяє збільшити інформативність знімків і достовірність їхнього дешифрування. Таке знімання дозволяє виявляти фізико-хімічні і структурні властивості об'єктів.

У загальному випадку багатозональний знімок одержують у результаті знімання одним багатооб'єктивним датчиком чи комплектом синхронізованих датчиків з різними комбінаціями фотоприймачів і світлофільтрів, що дають зональні зображення в різних спектральних інтервалах.

При багатозональному зніманні одержують серію знімків, неідентичних за розподілом оптичних щільностей, що зв'язано з розходженнями у відбивній здатності об'єктів знімання в різних зонах спектра.

Об'єкти розвідки мають різні спектри відбиття. Якщо усю видиму область електромагнітного випромінювання розбити на кілька зон і через світлофільтри, що пропускають тільки визначену частину усього видимого спектра, приймати випромінювання від якого-небудь об'єкта, то інтенсивність і форма прийнятих сигналів виявляться різними. Маючи зображення земної поверхні в цьому діапазоні, можна за вимірами інтенсивності випромінювання від різних об'єктів визначити їхній тип. Якщо взяти ще один діапазон хвиль і в ньому виміряти інтенсивність випромінювання від тих же об'єктів, тоді випромінювальні і відбивні характеристики об'єктів, різних за своїми фізичними і біологічними властивостями, проявляться сильніше, різкіше і дозволять виявити наявні в них відмінності. Наприклад, посіви різних культур, зняті з космічних апаратів у

декількох зонах спектра, зобразяться по-різному, виявившись на знімках зовсім різного кольору, відтінку і щільності. Так у діапазонах (0,4 - 0,44 мкм), (0,62 - 0,66 мкм) виявилось можливим розрізнити такі категорії посівів, як жито, кукурудза, соя, люцерна й оголений ґрунт [14].

Виходячи з практичних розумінь, найбільш доцільне створення трьох -, чотирьох -, і шестидіапазонних багатозональних датчиків і більше [17]. Для правильної фотометричної обробки знімків у кожен кадр установлюється сенситометричний клин, що є еталоном яскравості зображень різних природних утворень. Геометрична корекція і точна взаємна прив'язка знімків на етапі нормалізації дозволяє одержати строго ідентичні зображення в усіх каналах. Геометрична точність зображення, суворя паралельність оптичних осей всіх об'єктивів і можливість точного суміщення знімків, виконаних у різних спектральних каналах, дозволяє одержувати високоякісні кольоросинтезовані зображення.

Для обробки багатозональних знімків у сучасних системах застосовується спеціальне програмне забезпечення, що дозволяє суміщати цифрові образи декількох зображень (звичайно двох-чотирьох) з розфарбуванням кожного в різні кольори. У результаті виходить сполучене зображення в натуральних чи умовних кольорах, що може бути використане для візуального дешифрування.

Багатозональні знімки повинні відрізнятися високою фотографметричною, спектральною і фотометричною якістю і забезпечувати можливість проведення всебічного аналізу відбитих об'єктів. Різноманіття об'єктів розвідки, що повинні розкриватися за матеріалами багатозонального знімання, вимагає, щоб отримані в різних зонах спектра знімки відображали досить малі відмінності в абсолютних і відносних спектральних яскравостях відбитих об'єктів. Ці відмінності дозволяють визначити по знімках вид, стан, хімічний склад і інші особливості відбитих об'єктів. Саме можливість встановлення однозначної відповідності між природними і штучними об'єктами місцевості і їхнім спектральним випромінюванням відкрила широкі перс-

пективи подальшого удосконалювання знімання, автоматизації обробки одержуваних багатозональних знімків. Перехід до багатозональних знімків від знімання в широкому діапазоні видимої області спектра приводить до істотного ускладнення знімальної апаратури. Багатозональний датчик практично повинний бути сполученням декількох синхронно працюючих датчиків.

Підвищення інформативності одержуваних знімків здійснюється шляхом підвищення роздільної здатності системи “об’єктив - фотоприймач”. Саме тому при створенні багатозональних датчиків важливо вирішити проблему підвищення роздільної здатності одержаних знімків.

Багато вимог, висунутих до багатозональної апаратури, призначеної для космічного знімання, є дуже суперечливими. Знімання у вузьких зонах спектра вимагає використання фотоприймачів з високою чутливістю, однак це зажадає або збільшення площі елементарного фотоприймача, або зменшення товщини світлочутливого шару, або використання накопичення енергії за рахунок переносу зарядів у матричних фотоприймачах. Збільшення площі чуттєвого елемента погіршує роздільну здатність одержуваних знімків. Зменшення товщини світлочутливого шару пов’язано з технологічними труднощами. Використання накопичення переносом висуває підвищені вимоги до точності синхронізації переносу зарядів і руху КА. Помилки цієї синхронізації погіршують роздільну здатність знімків.

Однією з вимог, висунутих до датчиків, є велика ширина смуги знімання. У той же час, аналіз багатозональних знімків не дозволяє мати великі кути огляду, тому що зі збільшенням останніх значно змінюється освітленість по полю знімка, що ускладнює ідентифікацію об’єктів за спектральною ознакою.

3.13. Принципи побудови оптико-електронних систем видової розвідки

Оптико-електронні системи видової розвідки (ОЕСВР) можуть бути класифіковані за різними ознаками: за типом застосовуваного приймача випромінювання, за способом розкладання елементів земної поверхні, а також за кількістю використовуваних зон електромагнітного спектра [17].

3.13.1. Класифікація оптико-електронних систем

За типом застосовуваного приймача випромінювання оптико-електронні системи класифікуються на системи з одноелементним і багатоелементним приймачем випромінювання.

У свою чергу, системи з багатоелементним приймачем випромінювання за способом розкладання елементів земної поверхні поділяються на системи з послідовним і паралельним розкладанням елементів. За кількістю використовуваних зон електромагнітного спектра ОЕСВР поділяються на одноканальні і багатоканальні [17].

Одноканальна оптико-електронна система з одноелементним приймачем випромінювання

Найпростішою оптико-електронною системою є система з одноелементним приймачем, спрощена функціональна схема якої зображена на рис. 3.103.

У систему входять: оптичний дефлектор, об'єktiv приймальної частини з діафрагмою, приймач випромінювання, підсилювач, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), запам'ятовуючий пристрій (ЗП) зображення, система охолодження приймача випромінювання (для ІЧ ОЕСВР).

Оптичний дефлектор здійснює сканування земної поверхні поперек напрямку польоту (рис. 3.104).

Власний рух літального апарата забезпечує сканування уздовж напрямку польоту. Випромінювання від елементів земної поверхні за допомогою оптичного дефлектора послідовно направляється на об'єktiv, що проектує зображення елемента земної поверхні на чутливу площадку приймача випромінювання.

Власний рух літального апарата забезпечує сканування уздовж напрямку польоту. Випромінювання від елементів зем-

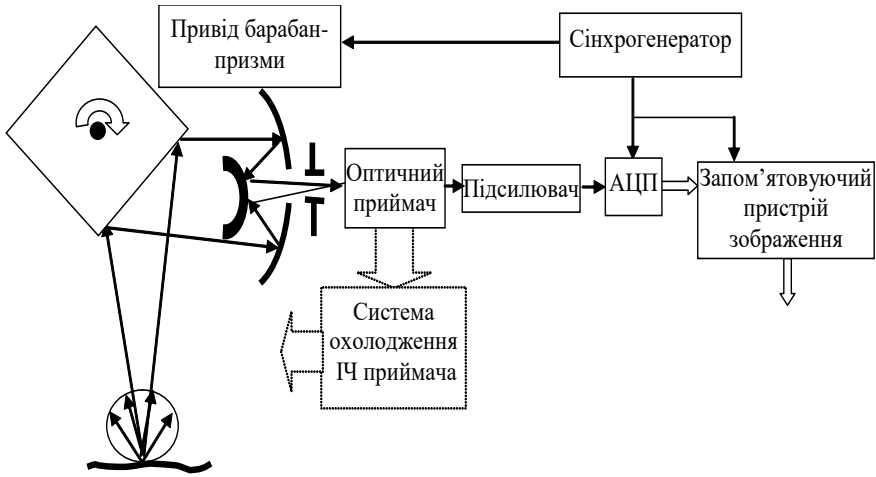


Рис.3.103. Схема роботи скануючої ОЕСВР

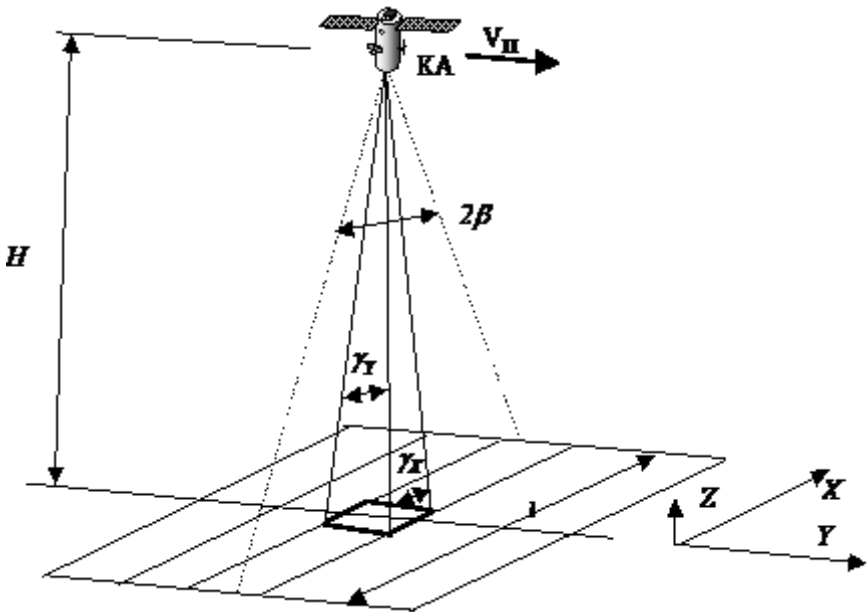


Рис. 3.104. Схема сканування земної поверхні
одноканальною ОЕСВР

ної поверхні за допомогою оптичного дефлектора послідовно направляється на об'єктив, що проектує зображення елемента земної поверхні на чуттєву площадку приймача випромінювання.

При скануванні оптичним дефлектором візуються різні елементи ЗП і потік випромінювання, що падає на приймач, змінюється. Приймач випромінювання перетворить електромагнітне випромінювання в перемінний електричний сигнал, що пропорційний різниці випромінювань двох сусідніх елементів ЗП. З виходу приймача випромінювання сигнал по перемінній складовій попадає в підсилювач, що здійснює його посилення до рівня, достатнього для наступної передачі сигналів в АЦП. З виходу АЦП відліки сигналу записуються в запам'ятовуючий пристрій

синхронно з розгорненням дефлектора. Швидкість поступального руху літального апарата вибирається з умови невеликого перекриття сусідніх рядків сканування (приблизно на 1/3 елемента розділення). Інформація одночасно може по радіоканалу передаватися на землю [17].

Одноканальні ОЕСВР із багатоелементним приймачем випромінювання

Оптико-електронні системи з багатоелементним приймачем випромінювання, у свою чергу, можуть бути розділені на системи з послідовним (рис.3.105, а) і паралельним (рис.3.105, б) скануванням картини, системи з одночасним зніманням рядка зображення (системи з лінійним приймачем) і системи з одночасним зніманням кадру зображення (системи з матричним приймачем).

При паралельному розкладанні картини чуттєві елементи приймача орієнтовані перпендикулярно до лінії сканування (рис. 3.106). Вихідні сигнали всіх чуттєвих елементів підсилюються у підсилювачах, обробляються і подаються на пристрій запису чи індикації одночасно, тобто паралельно [17].

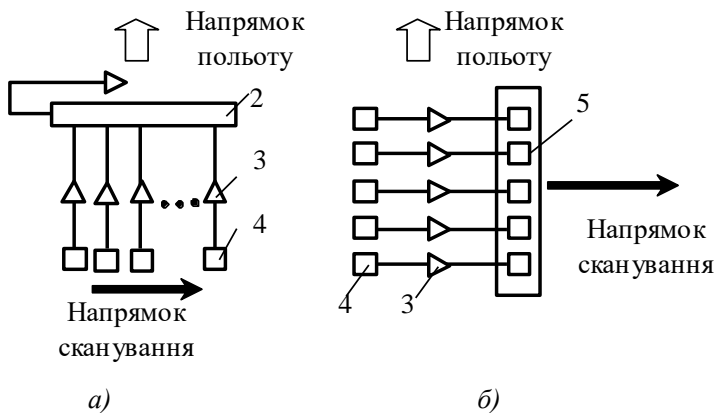


Рис. 3.105. ОЕ системи з багатоелементним приймачем випромінювання: а) - послідовне сканування; б) - паралельне сканування

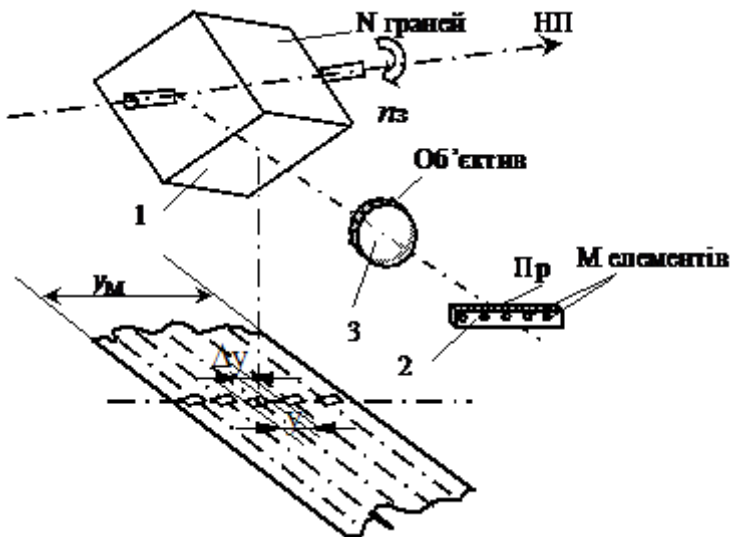


Рис. 3.106. Схема сканування з багатоелементним приймачем випромінювання; 1 - оптичний дефлектор; 2 - приймач випромінювання; 3 - об'єктив; НП - напрямок польоту

Основна перевага паралельної обробки сигналу полягає у тому, що можна створити дуже компактні приймальні пристрої, у яких використовується сканування в промені, що сходиться.

Варіюючи кількістю включення чуттєвих елементів приймача, можна значно розширити діапазон V_{Π}/H роботи оптико-електронної системи при одній і тій же швидкості обертання оптико-механічного дефлектора приймальної частини системи.

Основний недолік паралельної обробки сигналів полягає у тому, що розкид по виявляльній здатності елементів приймача в лінійці приводить до нерівномірності оптичної щільності рядків зображення. Такі викривлення ще називають сканерною смугастістю зображення.

При послідовному розкладанні картини лінійка чуттєвих елементів орієнтована паралельно лінії сканування і кожна точка зображення сканується всіма чуттєвими елементами. Вихідні сигнали елементів надходять у лінію затримки 2 і підсумовуються на виході, при цьому сума використовується як єдиний сигнал. Інтегруюча лінія затримки лінійно підсумовує сигнали чуттєвих елементів приймача і витягає корінь квадратний із суми квадратичних значень шумів. Іншими словами, система здійснює накопичення сигналів від різних приймальних елементів. Загальна чутливість такого багатоелементного ОЕ приймача випромінювання оцінюється ефективною виявляльною здатністю $D_{E\Phi}^*$ і ефективним відношенням сигналу до шуму еквівалентного одноелементного приймача. Якщо виявляльна здатність D_i^* усіх елементів однакова, то ефективна виявляльна здатність $D_{E\Phi}^*$ буде дорівнювати

$$D_{E\Phi}^* = \sqrt{\sum_i^n D_i^{*2}},$$

де n - кількість окремих чуттєвих елементів.

Основні переваги послідовного сканування полягають у відсутності сканерної смугастості, оскільки розкладання елементів земної поверхні здійснюється як би одним чуттєвим елементом. При послідовному розкладанні зростає також загальна чутливість системи, що визначає необхідну кількість чуттєвих елементів у лінійці. Основний недолік послідовного

сканування полягає в тому, що приходиться використовувати сканування в паралельному світловому пучку, для створення якого необхідне застосування складної і громіздкої оптичної системи.

3.13.2. Параметри і характеристики оптико-електронних інфрачервоних систем

Параметри, що визначають різкісні властивості зображення

Різкісні властивості зображення, одержуваного ІЧ ОЕСВР, визначаються [17]:

миттєвим полем зору γ_{Π} приймальної частини системи;

роздільною здатністю R ;

миттєвим полем зору елементарного інформаційного каналу (ЕІК) ІЧ системи $\gamma_{ЕІК}$;

кутовим розділенням $\gamma_{ОЕС}$ системи;

детальністю d і приведеною детальністю d^* одержуваного зображення;

функцією передачі модуляції.

Миттєве поле зору приймальної частини γ_{Π} - це кут, у межах якого приймач сприймає випромінювання від елемента ландшафту в даний момент положення візирного променя. Цей кут визначається відношенням

$$\gamma_{\Pi} = a/f'$$

де a - лінійний розмір чуттєвої площадки приймача випромінювання; f' - фокусна відстань приймальної оптичної системи.

Розрізняють миттєве поле зору в напрямку сканування $\gamma_{\Pi X}$ і в напрямку польоту космічного апарата $\gamma_{\Pi Y}$.

Роздільна здатність R - величина, зворотна мінімальному подвоєному розміру елемента зображення на виході реєструючого пристрою, яка ще розрізняється дешифрувальником при

заданому тепловому контрасті. Вона може визначатися експериментально в лабораторних чи натурних умовах або розраховуватися за характеристиками окремих ланок системи з урахуванням викривляючого впливу атмосфери і факторів польоту. Розмірність роздільної здатності - міліметр⁻¹.

Величини γ_{II} у напрямках X (сканування) і Y (польоту) різні, однак на практиці для простоти їх часто приймають рівними. Миттєве поле зору ЕІК є найважливішим параметром, що характеризує різкісні властивості одержуваного зображення, його роздільну здатність. Вимірюється γ_{II} у мілірадіанах чи кутових хвилинах.

Кутове розділення γ_{OEC} системи дорівнює:

$$\gamma_{OEC} = 2 \gamma_{II}.$$

Кутове розділення визначає максимальну кутову просторову частоту

$$\nu' = 1/\gamma_{II},$$

яка ще сприймається системою.

Детальність d одержуваного ІЧ системою зображення визначається шириною смуги такого елемента, розташованого на місцевості міри, зображення якого на знімку ще може бути дешифровано. Детальність визначається з виразу

$$d = \gamma_{EIK} \cdot H$$

де H - висота польоту.

Приведена детальність d^* визначає роздільну здатність ОЕСВР, приведену до місцевості:

$$d^* = 2d = 2\gamma_i H = \frac{1}{R\left(\frac{1}{m}\right)} \cdot 10^{-3},$$

де $1/m$ - масштаб зображення.

Спектральний діапазон роботи

Спектральний діапазон роботи $\Delta\lambda$ визначається ділянкою спектра теплового випромінювання, у якому працює ІЧ система [17]. Він, в основному, визначається спектральною чутливістю приймача потоку випромінювання і спектральними характеристиками оптичних елементів, застосовуваних у системі. Вибір приймача потоку випромінювання зв'язаний, у першу чергу, з

розподілом температур фонів і об'єктів і з їхньою спектральною щільністю випромінювання. Більшість сучасних ІЧ систем працюють у діапазонах 1...2 мкм і 8...14 мкм. Цим двом діапазонам відповідають вікна прозорості атмосфери, у межах яких атмосфера є прозорою для теплового випромінювання земної поверхні (див. рис. 3.25). Максимум спектральної щільності випромінювання земної поверхні при температурі 20° С знаходиться на довжині хвилі $\lambda = 10\text{мкм}$.

Для холодних фонів і малоконтрастних об'єктів кращі результати дає ІЧ зйомка в діапазоні 8...14 мкм. Для об'єктів і фонів з підвищеною температурою доцільніше діапазон 3...5 мкм.

Поріг температурної чутливості

Поріг температурної чутливості характеризує здатність ІЧ системи розрізняти слабкі сигнали на фоні шумів [17]. Ця величина позначається $\Delta T_{\text{ПОР}}$. Вона являє собою різницю температур об'єкта і фону, що викликає появу сигналу U_C , пік якого дорівнює середньоквадратичному значенню шуму $U_{\text{Ш}}$. Величина $\Delta T_{\text{ПОР}}$ обчислюється по співвідношенню:

$$\Delta T_{\text{ПОР}} = \frac{\Delta T}{U_C / U_{\text{Ш}}},$$

де $\Delta T = T_{\text{ОБ}} - T_{\text{Ф}}$; $U_C / U_{\text{Ш}}$ - відношення сигнал/шум.

При визначенні $\Delta T_{\text{ПОР}}$ передбачається:

- величина $U_C / U_{\text{Ш}}$ приймається рівною одиниці;
- елементи об'єкта і фону є дифузійними випромінювачами і випромінюють як абсолютно чорні тіла;
- кутовий розмір чуттєвого елемента приймача випромінювання і кутовий розмір елемента об'єкта досить малі;
- підсилювач не вносить додаткових шумів;
- спектральна щільність виявляльної здатності приймача випромінювання D_λ не залежить від інших параметрів;
- чутливість приймача випромінювання однакова в межах площі його чуттєвого елемента.

Поріг чутливості за енергетичною яскравістю.

Поріг чутливості ІЧ системи за енергетичною яскравістю характеризує мінімальну яскравість елемента земної поверхні, яка виявляється системою $L_{e \min}$ [17].

Коли розміри елемента земної поверхні визначаються розмірами приймача випромінювання, величина потоку випромінювання, що падає на приймач, пропорційна квадрату відносного отвору об'єктива і не залежить від відстані до земної поверхні. Умовою виявлення падаючого на приймач потоку випромінювання є перевищення у p разів граничного потоку приймача випромінювання.

Тоді яскравість, що мінімально виявляється $L_{e \min}$, визначається виразом:

$$L_{e \min} = \frac{4}{\pi} p \frac{\sqrt{\Delta f_{ш}}}{D^*(\lambda_{\max}) \tau_{\Sigma} D_{B.X.3} \gamma_{\Pi} \left(\frac{D_{B.X.3}}{f'} \right)},$$

де γ_{Π} - миттєве поле зору прийомної частини системи; $\Delta f_{ш}$ - еквівалентна шумова смуга, Гц; $D^*(\lambda_{\max})$ - питома виявляльна здатність приймача випромінювання, Вт⁻¹смГц^{1/2}; τ_{Σ} - коефіцієнт пропускання, що характеризує сумарну дію атмосфери, дефлектора й об'єктива; p - коефіцієнт запасу, $p = 1..10$.

Об'єктив приймальної оптичної частини системи характеризується діаметром $D_{B.X.3}$.

Параметри, що визначають тонові контрасти

На формування тонових контрастів ІЧ знімків і відповідно на ефективність застосування ІЧ знімання істотний вплив вносять такі технічні параметри ІЧ системи [17]:

спектральний діапазон роботи $\Delta\lambda$;

температурна чутливість $\Delta T_{\Pi OP}$;

рівень прив'язки $u_{\Pi P}$;

динамічний діапазон (кількість відтворених градацій m півтонової шкали).

Рівень прив'язки (рівень чорного) - це постійна складова напруги відеосигналу в ІЧ ОЕСВР, пропорційна середній температурі $T_{СЕР}$ місцевості, яка розвідується. У ІЧ системах рівень прив'язки автоматично змінюється за допомогою системи стабі-

лізації яскравості зображення. Це сприяє кращому проробленню малококонтрастних об'єктів на тепловому знімку, але спотворює на ньому співвідношення теплових контрастів на місцевості внаслідок обмеженості динамічного діапазону системи.

Динамічний діапазон системи m - це відношення різниці температур ΔT елементів ландшафту, що відповідає лінійній ділянці характеристичної кривої, до величини температурної чутливості $\Delta T_{ПОР}$ (рис. 3.108).

Відомо, що число градацій m щільності знімка, помітних оком дешифрувальника, може досягати декількох десятків. При температурній чутливості системи, рівній $\Delta T_{ПОР}$, і при повному використанні можливостей АЦП буде зареєстрований інтервал температур земної поверхні

$$\Delta T = m \Delta T_{ПОР}.$$

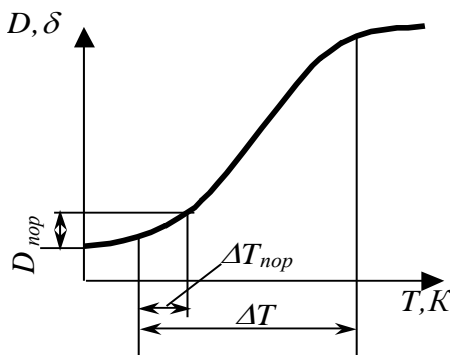


Рис.3.108. Характеристична крива ІЧ ОЕСВР для визначеного рівня прив'язки: D - щільність знімка, у відносних одиницях; T - температура об'єкта, К

Однак обмеження (за рахунок нелінійності статичної характеристики) істотно скорочують число відтворених градацій, доводячи їх приблизно до 5...10.

Обмеженість динамічного діапазону системи істотно утруднює виділення найбільш нагрітих об'єктів особливо тоді, коли ОЕСВР має високу температурну чутливість. При зменшенні чутливості ІЧ системи збільшуються значення температури, які

відповідають кожній градації щільності почорніння знімка. У цьому випадку розширюється динамічний діапазон системи за температурою, що поліпшує виділення об'єктів з аномально високотемпературним нагріванням, але, з іншого боку, погіршує виділення малоконтрастних об'єктів.

Мінімально роздільна різниця температур

Мінімально роздільна різниця температур ΔT_{PO3} являє собою різницю температур штрихового тест-об'єкта (рис. 3.109), яка забезпечує поріг відношення температурного сигналу до шуму, який є необхідним для просторового розділення [17].

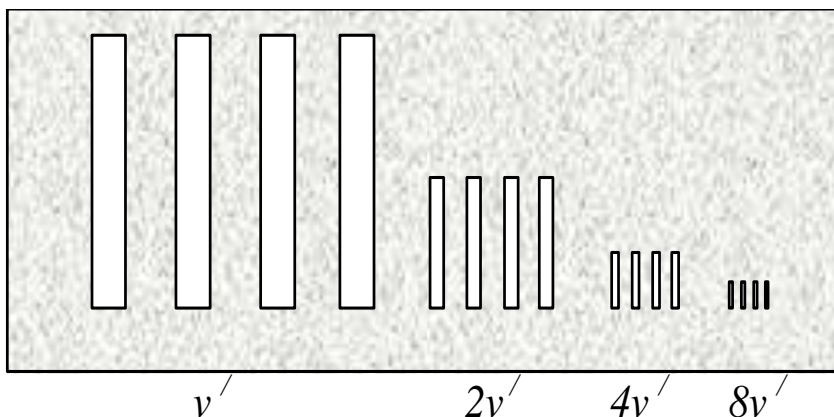


Рис.3.109. Тест-об'єкти для визначення ΔT_{PO3}

При імовірності правильного виявлення однієї смуги міри $p = 0,9$ відношення сигнал/шум на виході приймача повинне бути приблизно рівним 4,5. При цих умовах вираз для визначення різниці температур, яка мінімально розділяється, визначається із співвідношення

$$\Delta T_{PA3P} = \frac{3\Delta T_{ПОР} \gamma_{П} v'}{T_C(v') \sqrt{\Delta f_{ш} t_d}},$$

де $\Delta T_{ПОР}$ - поріг температурної чутливості; $\gamma_{П}$ - миттєве поле зору приймача випромінювання, мрад; v' - кутова просторова частота, мрад⁻¹; t_d - час спостереження одного елемента розділен-

ня, с; $\Delta f_{ш}$ - шумова смуга пропускання системи при білому шумі; $T_C(m)$ - ФПМ інфрачервоної ОЕСВР.

3.13.4. Тематичні картографи космічних апаратів Landsat

Космічні апарати Landsat -4,5 оснащені приладом ТМ (Thematic Mapper, тематичний картограф), що дозволяє формувати зображення в 7 ділянках спектра [40].

Призначення спектральних діапазонів тематичного картографа ТМ надане в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Призначення спектральних діапазонів ТМ

№	Довжина хвилі, мкм	Заявлене призначення діапазону
1	0.45-0.52	Оцінка хлорофілу і каротину в рослинних покривах і поділ опадаючих і вічнозелених рослин
2	0.52-0.60	Оцінка відбивної здатності рослин у зеленому діапазоні
3	0.63-0.69	Оцінка поглинальної здатності хлорофілу для визначення виду посадок
4	0.76-0.90	Оцінка відбивної здатності рослин у ближньому ІЧ - діапазоні для визначення кількості біомаси
5	1.55-1.75	Визначення вологості рослинності і розрізнення сніжного і хмарного покривів
6	10.40-12.50	Температурне картування
7	2.08-2.35	Оцінка вологості рослин і вмісту іонів окису водню в ґрунті

Телескоп тематичного картографа має (табл. 3.9) апертуру 40.6 см. і фокусну відстань 2.4 м. Кутове розділення у 1-4 каналах (0.45-0.9 мкм) складає 42.5 мкрад, у 5 і 7 каналах (1.55-1.75 і 2.08-2.35 мкм) - 43.8 мкрад, а в 6 каналі (10.4-12.5 мкм) - 170 мкрад.

Формування зображення здійснюється за допомогою механічного обертання дзеркала діаметром 53 см з частотою 7 Гц.

Таблиця 3.9

Характеристики ТМ

Апертура телескопу ТК, см	40.6
Фокусна відстань, м	2.4
Кутове розділення, мкрад	
- у 1-4 каналах	42.5
- у 5,7 каналах	43.8
- у 6 каналі	170
Діаметр дзеркала, см	53
Спосіб формування зображень	Механічне обертання дзеркала
Частота обертання дзеркала, Гц	7
Тип приймача	
- у 1-4 каналах	Матриця кремнієвих фотодіодів
- у 5,7 каналах	Матриця детекторів із InSb
- у 6 каналі	Детектори із HgCdTe
Температура охолодження 5,6,7 каналів, К	190
Просторова роздільна здатність, м:	
-у видимих і ближній інфрачервоній ділянках спектра	30
-у тепловій ІЧ ділянці спектра	120
Радіометричне розділення, рівні	256
Абсолютна радіометрична точність, %	10
Ширина смуги огляду, км	185
Швидкість формування вихідного інформаційного потоку, Мбіт/с	85
Маса всього пристрою, кг	245
Споживана потужність, Вт	345

У 1-4 каналах використовується матриця кремнієвих фотодіодів, у 5 і 7 каналах - матриця детекторів з антимоніду індію, у 6 каналі застосовуються детектори з ртутнокадмієвого теллурида (HgCdTe), причому фотоприймачі 5, 6 і 7 каналів охолоджуються до $T=190$ К.

Схема пристрою ТМ приведена на рис. 3.111.

На космічному апараті Landsat-6 як цільова апаратура використовується удосконалена спектрозональна система ЕТМ (Enhanced Thematic Mapper, удосконалений тематичний картограф). Камера ЕТМ розрахована на побудову зображень у восьми

ділянках спектра і формує два вихідних інформаційних потоки зі швидкістю по 84.9 Мбіт/с кожний [40].

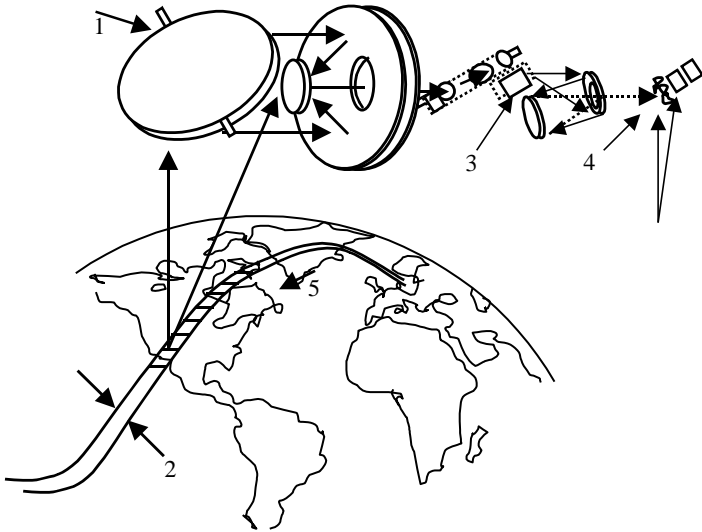


Рис.3.111. Тематичний картограф ТМ: 1 - дзеркало, що сканує; 2 - смуга огляду шириною 185 км; 3 - кремнієві детектори і фільтри на діапазони 1-4; 4 - охолоджені детектори і фільтри на діапазони 5-7; 5 - напрямок польоту КА

Пристрій тематичного картографування ЕТМ приведено на рис. 3. 112.

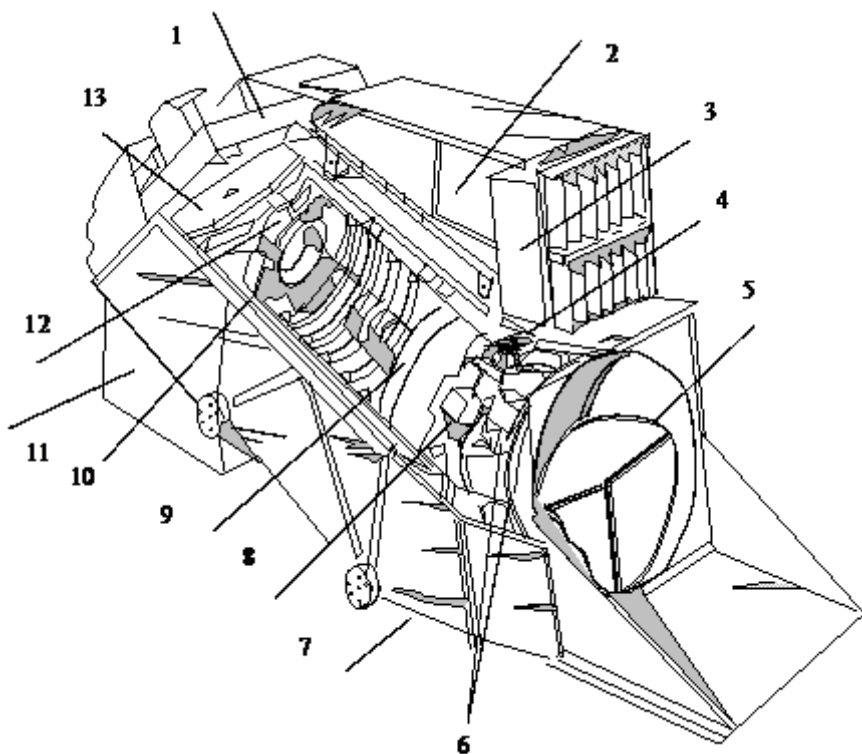


Рис.3.112. Пристрій тематичного картографування ЕТМ:

1 - привід скануючого дзеркала; 2 - електронне устаткування; 3 – мультиплексом; 4 - резервний затвор об'єктива; 5 - блок охолодження; 6 - блок фокусування; 7 - напрямок уздовж траси КА; 8 - ґрати фотоприймачів, розміщені у фокальній площині;

9 - первинне дзеркало; 10 - вторинне дзеркало; 11 - сонцезахисний екран; 12 - блок вторинного дзеркала; 13 - скануюче дзеркало

Зміст кожного інформаційного потоку може відповідати одному з трьох форматів:

знімки в діапазонах 1-7 (звичайний режим);

знімки в панхроматичному каналі й у каналах 4-6 (режим використовується переважно в сільськогосподарських додатках);

знімки в панхроматичному каналі у каналах 4, 6 і 7 (режим переважно використовується при вирішенні геологічних задач).

Характеристики спектральних каналів камери ЕТМ представлені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Спектральні діапазони камери ЕТМ ШСЗ Landsat-6

Номер діапазону	Довжина хвилі, мкм	Тип детектора (число детекторів)	Просторове розділення, м	Поле зору, мкрад
ПХ	0.52-0.9	SiPb(32)	13×15	18.5×21.3
1	0.45-0.52	SiPb(16)	30	42.5
2	0.52-0.60	SiPb(16)	30	42.5
3	0.63-0.69	SiPb(16)	30	42.5
4	0.76-0.9	SiPb(16)	30	42.5
5	1.55-1.75	InSb(16)	30	42.5
6	10.42-12.5	HgCdTe (4)	120	170.0
7	2.08-2.35	[nSb(16)	30	42.5

Космічний апарат Landsat-7 оснащений багатоспектральною камерою ЕТМ+ (ЕТМ-Plus, Enhanced Thematic Mapper) [40]. Камера має технічні характеристики, що приведені в таблиці 3.11.

3.13.5. Багатозональні оптико-електронні скануючі пристрої високого розділення

Багатозональний скануючий пристрій МСУ-Е призначений для оперативного отримання з борта космічного апарата відеоінформації про підстильну поверхню Землі у трьох спектральних

Таблиця 3.11

Технічні характеристики ЕТМ+

Кількість спектральних діапазонів	8
Панхроматичний діапазон, мкм	0.52-0.9
Інтервал довжин хвиль, мкм	0.45-12.5

Просторове розділення, м	
-у панхроматичному діапазоні;	15
-у видимому, ближньому ІЧ, ІЧ-діапазонах;	30
-у тепловому ІЧ діапазоні.	60
Радіометрична точність, %	5
Ширина смуги огляду, км	185
Періодичність огляду, доби	16
Вага, кг	424
Споживана потужність, Вт	720
Швидкість передачі інформації, Мбіт/с	150

зонах у діапазоні довжин хвиль 0,5-0,9 мкм із просторовим розділенням 32 м (у надирі). Він відноситься до класу вузькокутових скануючих пристроїв з порядковим розгорненням. МСУ-Е побудований на основі твердотільних багатоелементних лінійних фотоприймачів – приладів із зарядовим зв'язком. Кожна лінійка складається з 2048 фоточуттєвих елементів, що утворюють набір миттєвих полів зору, що формують поле зору приладу. При зчитуванні з ПЗЗ-фотоприймача зарядів формується один рядок зображення. Двомірне зображення отримується при послідовному порядковому зчитуванні інформації з лінійного ПЗЗ-фото-приймача при русі космічного апарата над підстильною поверхнею. З метою одержання інформації в широкій зоні огляду використовується переміщення оптичної осі в площині, що забезпечує зсув оптичної осі приладу в межах $\pm 30^\circ$ із кроком 2° [38].

На рис. 3.113 показана спрощена схема оптичної системи МСУ-Е.

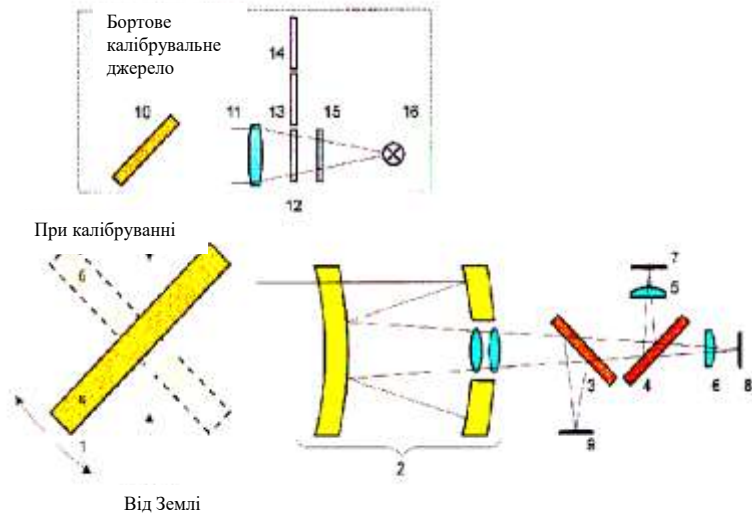


Рис. 3.113. Спрощена схема МСУ-Е

Потік випромінювання від підстильної поверхні, відбиваючись від плоского поворотного дзеркала 1, попадає на дзеркально-лінзовий об'єктив 2 з фокусною відстанню 349,2 мм і ефективним відносним отвором 1:4,7. У вихідному положенні (а) поворотне дзеркало встановлюється під кутом 45° до оптичної вісі об'єктива. За командою з Землі чи від програмно-часового пристрою космічного апарата включається привід поворотного дзеркала. Він зсуває вісь перпендикулярно площині орбіти космічного апарата.

Потік випромінювання, пройшовши через об'єктив, попадає в спектроподільну систему приладу. Спектроподільна система містить у собі інтерференційні світлофільтри 3 і 4, за допомогою яких здійснюється поділ інтегрального вхідного потоку випромінювання на три спектральних потоки з номінальними спектральними зонами 0,5-0,6; 0,6-0,7; 0,8-0,9 мкм.

Після фокусування і корекції астигматизму за допомогою циліндричних лінз 5 і 6 потоки випромінювання проєктуються на чуттєві площадки ПЗЗ-фотоприймачів 7, 8, 9. Три лінійних ПЗЗ-

фотоприймачі, кожний з яких працює у своїй спектральній зоні, розташовані у фокальній площині об'єктива.

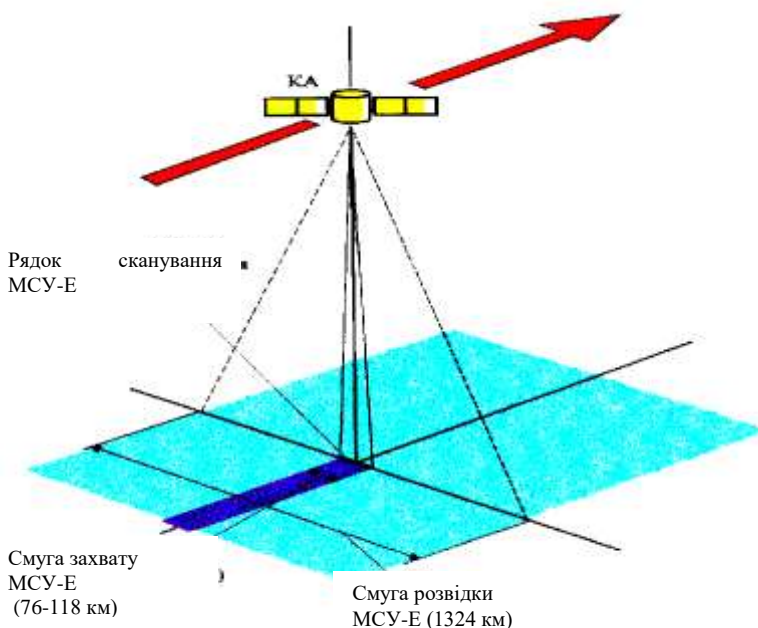


Рис. 3.114. Схема проведення зйомки місцевості з КА за допомогою апаратури МСУ-Е

Для стабілізації положення фокальної площини в діапазоні робочих температур до складу МСУ-Е входить система терморегулювання, що здійснює стабілізацію температури об'єктива.

Для контролю фотометричних характеристик у польоті в МСУ-Е мається система внутрішнього калібрування по бортовому еталонному джерелу випромінювання. Перехід МСУ-Е з режиму реєстрації випромінювання в режим калібрування здійснюється за командою з Землі поворотом дзеркала 1 у положення б.

У оптичній схемі бортового калібрувального джерела застосований об'єктив 11 з фокусною відстанню 75,2 мм і відносним отвором 1:4. Випромінювання від лампи 16 через ко-

ригувальний світлофільтр 15, світлофільтри, що послабляють 12-14 поворотної турелі й об'єктив 11 направляється на дзеркала 10 і 1 і, відбиваючись від них, попадає в прийомний об'єктив 2, а потім через спектроподільну систему направляється на чуттєві елементи лінійних ПЗЗ-фотоприймачів кожної зони.

Схема проведення зйомки місцевості з КА "Метеор-3М" №1 за допомогою апаратури МСУ-Е показана на рис. 3.114.

Інформаційно-технічні характеристики апаратури МСУ-Е приведені в таблиці 3.12.

У таблиці 3.13 приведені характеристики удосконаленого приладу МСУ-ЕУ[38].

Для КА МС-2-8 розроблено багатозональний скануючий пристрій МСУ-8.

Призначення МСУ-8. Апаратура МСУ-8 призначена для зондування підстильної поверхні Землі і забезпечення спектрозонального перетворення оптичного випромінювання видимого і ближнього інфрачервоного діапазону спектра у відеосигнал з наступною його корекцією.

На рис. 3.115 приведено зовнішній вигляд багатозонального скануючого пристрою МСУ-ЕУ.

МСУ-8 може використовуватися для вирішення народно-господарських, наукових, комерційних, військових і інших задач. Застосування МСУ на космічних апаратах забезпечує в порівнянні з традиційними наземними методами дослідження земної поверхні ряд переваг. МСУ є найбільш інформативним джерелом інформації на борті КА.

МСУ забезпечує ширину смуги огляду 48 км і проекцію пікселя на поверхні Землі 8 м для всіх спектральних і панхроматичного діапазонів при висоті орбіти близько 650 км.

Таблиця 3.12

Інформаційно-технічні характеристики апаратури МСУ-Е

Число спектральних зон	3
------------------------	---

Спектральні зони за рівнем 0,5 (номінальні значення): I II III	0,5-0,6мкм 0,6-0,7мкм 0,8-0,9 мкм
Вид сканування	площинний, однорядковий
Напрямок сканування	ліворуч, праворуч за напрямком польоту при спостереженні з орбіти
Смуга захвату для H=1020 км: - у надирі - на краю зони огляду	76км 84км
Кут зсуву осі візування	$\pm 30^\circ$
Крок зсуву осі візування	2°
Розділення на місцевості в надирі: - уздовж напрямку польоту - поперек напрямку польоту	32м 37,9м
Розділення на місцевості на краю зони огляду: - уздовж напрямку польоту - поперек напрямку польоту	32м 59м

Закінчення таблиці 3.12

Миттєве поле зору, що відповідає елементу ПЗЗ	7,6" x 7,6"
Відстань між центрами сусідніх фо-	7,6"

точувливих елементів (поперек напрямку польоту)	
Швидкість сканування	200 р/с
Діаметр вхідної зіниці об'єктива	87,5 мм
Відношення сигнал/шум при максимальній яскравості, не менше	200
Середньоквадратична погрішність виміру при максимальній енергетичній яскравості, не більше	5,9%
Число режимів фіксованого посилення (при співвідношенні режимів посилення)	4 (1:2:4:8)
Помилка взаємного розташування ПЗЗ лінійок у спектральних зонах, не більше	$\pm 0,5$ елементів зображення
Енергоспоживання приладу (без ланцюгів підігріву)	150 Вт
Маса приладу	33 кг

Таблиця 3.13

Інформаційно-технічні характеристики МСУ-ЕУ

Число спектральних зон	3
------------------------	---

Спектральні зони за рівнем 0,5: I II III	0,5-0,6 мкм 0,6-0,7 мкм 0,8-0,9 мкм
Діапазон кутів перенацілювання	$\pm 30^\circ$
Роздільна здатність (проекція пікселя) у надирі: - уздовж напрямку польоту - поперек напрямку польоту	34м 24 м
Діаметр вхідної зіниці об'єктива	87,5мм
Відношення сигнал/шум при максимальній яскравості, не менше	200
Енергоспоживання приладу - без ланцюгів підігріву - сер. споживання по ланках підігріву	130Вт 40Вт
Маса приладу	29кг
Габаритні розміри, мм	532×390×360
Відносний отвір об'єктиву	1:4.7
Фокусна відстань об'єктиву	350мм
Ширина зони огляду (смуги огляду)	800км (48 км)

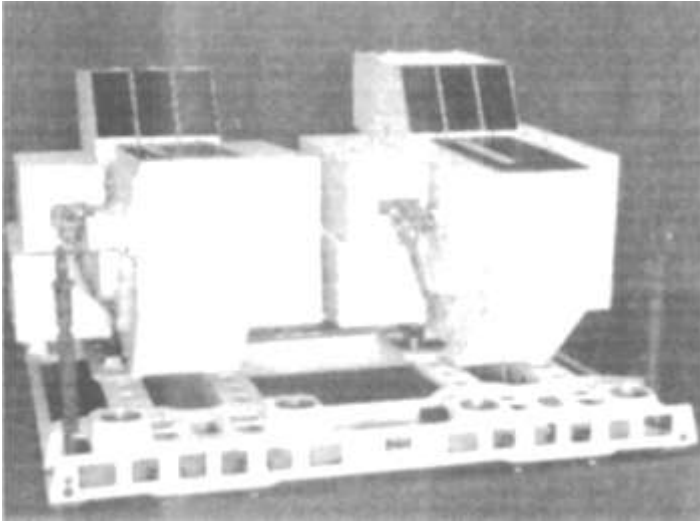


Рис. 3.115. Зовнішній вигляд МСУ-ЕУ

Поліпшення радіометричних характеристик удалося досягти, завдяки використанню ПЗЗ-лінійок з низьким рівнем шуму, малошумної електроніки, що зчитує, а також більш світлосильної оптики. Можливість зміни посилення відеотракту дозволяє розширити динамічний діапазон, для реєстрації різних рівнів цільової яскравості. Величина відношення сигнал/шум у всіх спектральних діапазонах складає більш 100 для коефіцієнта відбиття підстильної поверхні 20% і куті стояння Сонця більше 40 град. Для панхроматичного каналу співвідношення сигнал/шум буде складати не менше 300 при зазначених вище умовах зйомки.

Оптична система сканера. Оптична система сканера створена на підставі технології і з урахуванням досвіду, отриманого при запуску й експлуатації орбітальної системи Січ-1, Січ-1М та модуля дистанційного зондування Землі «Природа», що розроблявся при участі КБ «Південне». При проектуванні оптичної системи цих апаратів враховувалися оптичні, теплові і механічні властивості використовуваних оптичних матеріалів, а також стійкість до впливу радіації.

Оптична система сканера складається з дзеркально-лінзового об'єктива і спектроподільного блоку. Об'єктив оптичної системи побудований за схемою дзеркально-лінзового телескопа зі сферичними дзеркалами внутрішнього відбиття типу Манжена в сполученні з лінзовим компенсатором абераций у заданому полі зору. Загальна довжина об'єктива (відстань від першої поверхні до площини зображення) складає 45% від величини фокусної відстані, що дозволяє створити досить компактну конструкцію.

Об'єктив. Дзеркально-лінзовий об'єктив містить позитивну лінзу, дзеркало Манжена, мале дзеркало, приклеєне до позитивної лінзи, компенсатор польових абераций, що складається з негативної і позитивної лінз.

Спектроподільний блок. Спектроподільний блок складається зі спектроподільних пластин, на робочі поверхні яких наносяться багат шарові інтерференційні покриття, з компенсаційної пластини, циліндричних лінз і кольорових (смугових) світлофільтрів.

Одержання на виході кожного з трьох спектральних та панхроматичного каналів випромінювання з заданою формою спектрального пропускання досягається підбором інтерференційних покриттів, нанесених на спектроподільні пластини, і підбором кольорових (смугових) світлофільтрів.

Фотоприймачі. Як фотоприймачі використовуються ПЗЗ-лінійки фірми "Loral Fairchild", що мають 6000 пікселів розміром 10x10 мкм. Це дозволяє одержати ширину смуги огляду більше 48 км із проекцією пікселя на поверхні Землі 8 м при висоті орбіти близько 650 км.

Конструкція. Дзеркала і лінзи об'єктива закріплюються в оправі з титанового сплаву, що забезпечує, з однієї сторони досить точне положення, а з іншої - відсутність монтажних напруг

Таблиця 3.14

Інформаційно-технічні характеристики апаратури МСУ-8

Число спектральних зон	3
------------------------	---

Спектральні зони за рівнем 0,5: I II III	0,5-0,6мкм 0,6-0,7мкм 0,8-0,9мкм
Ширина панхроматичного діапазону	0.5-0.8
Діапазон кутів перенацілювання	$\pm 35^\circ$
Роздільна здатність (проекція пікселя) у надирі: - уздовж напрямку польоту - поперек напрямку польоту	8 м 8 м
Діаметр входної зіниці об'єктива	160 мм
Відношення сигнал/шум при максимальній яскравості, не менше	300
Енергоспоживання приладу -без ланцюгів підігріву -сер. споживання по ланках підігріву	80-140Вт 40Вт
Маса приладу	50кг
Габаритні розміри, мм	680×550×360

Закінчення таблиці 3.14

Відносний отвір об'єктива	1:6
Фокусна відстань об'єктива	810мм

Ширина зони огляду	650км
Ширина смуги огляду	48
Кількість пікселів у сканері	6000
Ймовірність безвідмовної роботи	0.95 (3 роки роботи), 0.89 (5 років)
Ємність ЗП	2Гбайта

у всіх умовах експлуатації. Додаткове центрування оптичних елементів виконується методом автоколімаційної зборки. Для збільшення механічної міцності об'єктива і мінімізації температурних деформацій корпус об'єктива виконаний з титанового сплаву.

Для придушення паразитної засвітки зовні й усередині об'єктива введені бленди. На внутрішню поверхню об'єктива і спектроподільного блоку (крім оптичних поверхонь) нанесене чорне матове покриття, що забезпечує низький коефіцієнт відбиття.

Система терморегулювання. На корпусі об'єктива встановлені нагрівачі системи терморегулювання. Тут же встановлені керуючі і телеметричні датчики температури. Зовнішня поверхня об'єктива закрита матами з безпиллової екрановакуумної теплоізоляції.

Інформаційно-технічні характеристики апаратури МСУ-8 приведені в таблиці 3.14.

Питання для самоконтролю

12. На яких довжинах хвиль вуглекислий газ та водяний пар не пропускає ІЧ-промені?
13. Що собою являє метеорологічна дальність видимості?

14. За якими ознаками можуть бути класифіковані оптико-електронні системи видової розвідки?
15. Доповісти склад найпростішої оптико-електронної системи.
16. Доповісти принцип роботи скануючої оптико-електронної системи видової розвідки.
17. У чому полягає принцип дії одноканальних ОЕСВР із багатоелементним приймачем випромінювання?
18. Доповісти призначення і принцип дії багатозонального скануючого пристрою.
19. Доповісти характеристики основних фотометричних величин і понять.
20. Із яких складових складається сумарна освітленість земної поверхні?
21. Який порядок розрахунку освітленості земної поверхні прямим і розсіяним світлом?
22. Доповісти поняття коефіцієнта контрастності.
23. Привести класифікацію природних об'єктів за характером спектральних коефіцієнтів яскравості.
24. У чому полягає закон Брюстера?
25. У чому полягає закон Бугера?
26. Що собою являє коефіцієнт поглинання?
27. У яких діапазонах хвиль атмосфера пропускає оптичне випромінювання?
28. Що собою являє показник розсіювання?
29. Яким чином розраховується метеорологічна дальність видимості?
30. Як розраховується показник заломлення земної атмосфери?
31. Привести зв'язок між двовимірною автокореляційною функцією і двовимірною спектральною щільністю потужності.
32. Які прийняті правила знаків і позначень при розрахунках оптичних систем?
33. Доповісти основні площини і параметри оптичної системи.

34. Що собою являє передній фокус?
35. Що собою являє задній фокус?
36. Що собою являє передня фокусна відстань?
37. Що собою являє задня фокусна відстань?
38. Що собою являє передня фокальна площина?
39. Що собою являє задня фокальна площина?
40. Що собою являє кутове збільшення?
41. Що собою являє лінійне збільшення?
42. Довести класифікацію оптичних елементів і деталей оптичних систем.
43. Що собою являє лінза?
44. Що собою являє призма?
45. Що собою являє клин?
46. Що собою являють плоскопаралельні пластинки?
47. Що собою являє дзеркало?
48. Що собою являє світлофільтр?
49. У чому полягає інваріант Аббе?
50. Яким чином розраховується фокусна відстань для тонкої лінзи?
51. Яким чином розраховується положення головних площин для тонкої лінзи?
52. Які існують аберації оптичних систем?
53. Який вигляд має структурна схема проходження інформації в фотосистемі?

РОЗДІЛ 4 ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ТА ФОТОГРАФІЧНИХ ДАТЧИКІВ І СИСТЕМ

4.1. Подання оптичних сигналів

Освітленість зображення об'єкта описується функцією

$$E = E(x', y', \lambda, t),$$

де E - освітленість зображення; x', y' - його поточні координати.

Стереоскопічне зображення є функцією чотирьох аргументів (x', y', t, x_0) , оскільки в цьому випадку необхідно враховувати координату x_0 середини зіниці об'єктива системи, що створює зображення. Таким чином, світлотехнічні параметри об'єкта і його зображення описуються функціями багатьох перемінних.

У більшості випадків можна вважати, що часові зміни потоку випромінювання об'єкта за проміжок дослідження дуже малі. Якщо розглядати потік від об'єкта у фіксованому діапазоні спектра, тобто коли він не залежить від зміни довжини хвилі, то функцію яскравості можна представити у вигляді

$$L = L(x, y),$$

а освітленість (яскравість) зображення у вигляді

$$E = E(x', y').$$

Представлення зображень у вигляді функцій двох змінних (або просторове представлення) є звичайним, тому що загальноприйняті такі характеристики об'єктів, як їхні лінійні розміри і площа. Розгляд яскравості у вигляді функції двох змінних необхідний, щоб перейти до представлення у просторово-частотні спектри зображень.

Розглянемо деякі загальні особливості оптичних сигналів. Під оптичним сигналом з погляду його функціонального призначення для випадків некогерентного світла розуміється зміна потоку випромінювання за просторовими координатами, що несе інформацію про розподіл випромінювальної або відбивної здатності об'єктів [28].

У загальному випадку всі оптичні сигнали ділять на дві групи: детерміновані і випадкові сигнали. Детермінованим є сигнал, який можна представити визначеною двовимірною функцією яскравості (зображення конкретних об'єктів – дерево, будівля тощо); випадкові сигнали представляються випадковими двовимірними функціями, коли закон розподілу яскравості заздалегідь невідомий (зображення різних ландшафтів).

Детерміновані сигнали, у свою чергу, розділяються на періодичні (наприклад, зображення лінійчатої міри великої довжини) і неперіодичні (будь-яке зображення одиночного об'єкта). Поділ си-

гналів на періодичні, неперіодичні і випадкові зв'язано з тим, що кожному з цих видів сигналів відповідають свої математичні методи просторово-частотного аналізу. Просторово-частотний аналіз оптичних сигналів подібний гармонійному спектральному аналізу часових електричних сигналів.

Спектральне представлення електричних сигналів широко поширене в теорії передачі сигналів і в теорії автоматичного регулювання через те, що таке представлення дає можливість досить точно оцінювати ступінь викривлення сигналів при їхньому проходженні через лінійні ланки, а також синтезувати сумарні характеристики складних систем за характеристиками їхніх окремих ланок.

4.2. Фокусуюча властивість лінзи

Розглянемо взаємодію світлової хвилі в параксіальній області з лінзою, що знаходиться в повітрі [12]. Радіуси кривизни поверхонь лінзи $-r_1$ і r_2 , а товщина $d=d_1+d_2$ (рис. 4.1). Якщо в площині $z=0$ падаюча хвиля дорівнює $E_{BX}(x,y,0)$, то на скривленій поверхні, описуваній рівнянням $z_1=\varphi_1(x,y)$, вона дорівнює

$$E_{BX}(x,y)e^{ikz},$$

де $k = 2\pi/\lambda$ - хвильовий множник; λ - довжина хвилі.

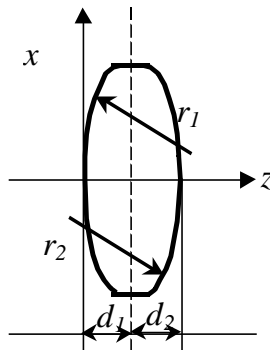


Рис.4.1. Взаємодія світлової хвилі в параксіальній області з лінзою

Амплітудний коефіцієнт пропускання сферичної двоопуклої лінзи дорівнює

$$\tau_a(x, y) = \tau_a \cdot e^{-ik \frac{x^2 + y^2}{2f'}},$$

де τ_a - коефіцієнт пропорційності.

Отже лінза модулює падаючу на неї хвилю по фазі.

Щоб краще зрозуміти роль лінзи в процесі перетворення сигналу, розглянемо окремий випадок системи, зображеної на рис. 4.2, коли $S = 0$; $S' = f'$.

Вхідним сигналом $E_{BX}(x, y)$ є поле ліворуч лінзи, а вихідним $E_{ВИХ}(x, y)$ - поле у фокальній площині лінзи.

Лінза є модулятор (модулюється фаза хвилі) і напруженість поля на виході лінзи дорівнює

$$E_{ВИХ}(x, y) = E_{BX}(x, y) \cdot \tau_a(x, y) = E_{BX}(x, y) \cdot e^{-ik \frac{x^2 + y^2}{2f'}}.$$

Лінза і фокальна площина розділені шаром простору товщиною f' . Шар простору може бути поданий як просторовий

фільтр з імпульсною характеристикою

$$h(x, y) = e^{ik \frac{x^2 + y^2}{2f'}}.$$

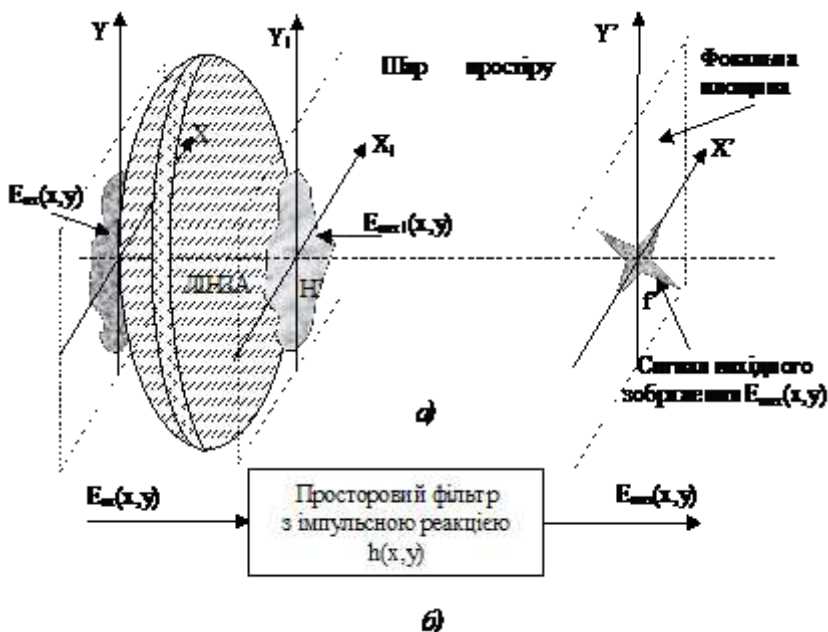


Рис.4.2. Оптична система з однієї лінзи, яка перетворює сигнал (а) та еквівалентний просторовий фільтр (б)

Тобто сигнал $E_{ВИХ}(x,y)$ у фокальній площині лінзи може бути отриманий як згортка (інтеграл Дюамеля) сигналу $E_{ВИХІ}(x,y)$ з імпульсною характеристикою системи “лінза-шар простору” $h(x,y)$:

$$E_{ВИХ}(x,y) = \iint_{\infty} E_{ВИХІ}(\xi,\eta) \cdot h(x-\xi, y-\eta) d\xi d\eta =$$

$$= \iint_{\infty} E_{ВХ}(\xi,\eta) \cdot e^{-ik \frac{\xi^2 + \eta^2}{2f'}} e^{ik \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2f'}} d\xi d\eta$$

або

$$E_{ВИХ}(x,y) = e^{ik \frac{x^2 + y^2}{2f'}} \iint_{\infty} E_{ВХ}(\xi,\eta) e^{-ik \frac{x\xi + y\eta}{f'}} d\xi d\eta .$$

$$\text{Позначимо } w_x = \frac{kx}{f'} = \frac{2\pi \cdot x}{\lambda \cdot f'}; w_y = \frac{ky}{f'} = \frac{2\pi \cdot y}{\lambda f'}.$$

Дані величини мають назву “просторові частоти” за відповідними координатами.

Тоді подвійний інтеграл являє собою перетворення Фур'є від функції $E_{BX}(x, y)$, тобто спектральну щільність вхідного сигналу:

$$S_{BX}(w_x, w_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} E_{BX}(\xi, \eta) \cdot e^{-ik \frac{x\xi + y\eta}{f'}} d\xi d\eta.$$

Отже

$$E_{BHX}(x, y) = S_{BX}(w_x, w_y) \cdot e^{ik \frac{x^2 + y^2}{2f'}}.$$

Для квадрата модуля вихідного сигналу одержимо

$$|E_{BHX}(x, y)|^2 = |S_{BX}(w_x, w_y)|^2 = G_{BX}(w_x, w_y).$$

Фотоприймачі, використовувані для ресстрації вихідного сигналу, реагують тільки на інтенсивність падаючого на них світла, тобто на квадрат модуля вихідного сигналу.

У загальному випадку сигнал у фокальній площині пропорційний спектральній щільності вхідного сигналу. У цьому і виявляється фокусуєча дія лінзи [12].

Ширина спектра вхідного сигналу зворотно-пропорційна його довжині l_{BX} :

$$\Delta w_{СП.ВХ} \approx \frac{2\pi}{l_{BX}}.$$

Довжина вихідного сигналу зворотно-пропорційна довжині вхідного сигналу

$$l_{ВІХ} = 2\lambda \cdot f / l_{ВХ}.$$

Таким чином, в основі фокусування лежить процес перетворення сигналу в його спектр. Основні етапи цього перетворення такі: спочатку сигнал модулюється по фазі, що змінюється за квадратичним законом (а просторова частота по лінійному). У результаті виходить сигнал з лінійною частотною

модуляцією. Потім промодульований сигнал пропускається через фільтр із квадратичною фазо-частотною характеристикою і рівномірною амплітудно-частотною характеристикою, причому фаза імпульсної характеристики фільтра змінюється як фаза коефіцієнта пропускання лінзи, тільки зі зворотним знаком (рис. 4.3).

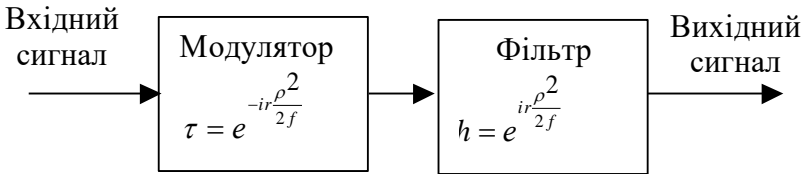


Рис.4.3. Процес перетворення сигналу в його спектр

З фокусуючою властивістю лінзи людина знайома давно, але зрозуміла ці явища всього 50 років тому. За сучасним уявленням фокусуюча дія лінзи – це процес перетворення сигналу в його спектральну щільність. Зв'язок між розмірами вхідного і вихідного сигналів у фокусуючій системі визначається теоремою масштабів, яка стверджує, що ширина спектра сигналу зворотно пропорційна його розміру. Чим більший розмір вхідного сигналу, тим менше розмір вихідного сигналу.

Розглянуті особливості фокусуючих властивостей лінзи, які полягають у явищі перетворення Фур'є, використовуються в спеціалізованих оптичних аналогових обчислювачах для:

- I) обчислення перетворення Фур'є одно- і двовимірних сигналів;
- II) виконання двовимірної узгодженої фільтрації в частотній області;
- III) виконання двовимірної кореляції в просторовій області.

Та обставина, що оптичні системи працюють паралельно, забезпечує оптичним обчислювачам значну перевагу перед цифровими, так, наприклад, оптичні забезпечують виконання до 10^{14} множень у секунду, що у мільйон разів більше, ніж цифрові.

4.3. Поняття просторової частоти та просторового спектра сигналу

Під просторовим гармонійним коливанням в оптиці, фотографії і ПЧ-техніці розуміють розподіл яскравості об'єкта або його зображення на площині за гармонійним законом. При цьому під просторовою частотою розуміється величина, зворотна періодові гармоніки, що описує розподіл яскравості уздовж якого-небудь напрямку. Просторові частоти відносять звичайно до осей прямокутної системи координат x та y і для двовимірної функції вони відповідно рівні

$$\mathcal{G}_x = 1/l_x; \mathcal{G}_y = 1/l_y,$$

де l_x і l_y - періоди просторових гармонік за осями x і y .

Яскравість може змінюватися за гармонійним законом або по одній з координатних осей двовимірного простору, або по обох осях. Відповідно вводяться поняття одномірної і двовимірної просторових гармонік. Розглянемо поняття одномірної просторової гармоніки паралельно з відомими поняттями електричної гармоніки:

$$U(t) = U \cos 2\pi f t;$$

$$B(x) = B \cos 2\pi \mathcal{G}_x x,$$

де $U(t)$ - зміна електричного сигналу; $B(x)$ - зміна яскравості об'єкта.

Розмірність часової частоти $1c^{-1}$, розмірність просторової частоти 1 мм^{-1} . При гармонійній зміні яскравості по обох осях x і y утвориться двовимірна просторова синусоїда

$$B(x, y) = B \cos 2\pi \mathcal{G}_x x \cos 2\pi \mathcal{G}_y y.$$

Під фазою просторової синусоїди розуміють стадію періодичного процесу, причому для гармонійного процесу практичне значення мають початкова фаза і взаємний зсув фаз [28].

Якщо для гармонійного часового процесу початкова фаза

$$\varphi = 2\pi \Delta t / t,$$

то для просторової частоти початкові фази

$$\varphi_x = 2\pi\Delta l_x / l_x; \varphi_y = 2\pi\Delta l_y / l_y,$$

де $\Delta l_x, \Delta l_y$ - відстані між початковою точкою коливання і точкою, у якій визначається фаза (за відповідними осями).

Під просторово-частотним аналізом оптичних сигналів розуміється представлення складних просторових сигналів у вигляді відповідних сум просторових гармонік або, іншими словами, у вигляді просторово-частотних спектрів. При цьому, спектри періодичних оптичних сигналів одержують розкладанням їх у ряд Фур'є, а спектри неперіодичних сигналів - інтегральним Фур'є - перетворенням. Спектри випадкових сигналів одержують спеціальним Фур'є-перетворенням [28].

У комплексній формі запис розкладання двовимірної періодичної функції $f(x, y)$ у ряд Фур'є має вигляд

$$f(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{n,m} e^{2\pi i(n\vartheta_x x + m\vartheta_y y)},$$

де

$$c_{n,m} = \vartheta_x \vartheta_y \int_{-l_x/2}^{l_x/2} \int_{-l_y/2}^{l_y/2} f(x, y) e^{-2\pi i(n\vartheta_x x + m\vartheta_y y)} dx, dy.$$

Спектри сигналів неперіодичних функцій визначаються за допомогою інтеграла Фур'є. Вираз для інтеграла Фур'є одержують граничним перетворенням ряду Фур'є для випадку, коли період перетвореної функції спрямовується до нескінченності. Вираз для інтеграла Фур'є двовимірної неперіодичної функції $B(x, y)$ має такий вигляд

$$B(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} b(i\vartheta_x, i\vartheta_y) e^{i(2\pi\vartheta_x x + 2\pi\vartheta_y y)} dx, dy,$$

де

$$b(i\vartheta_x, i\vartheta_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x, y) e^{-i(2\pi\vartheta_x x + 2\pi\vartheta_y y)} dx, dy$$

комплексний спектр, названий також спектральною щільністю амплітуд (або спектром амплітуд). Операція знаходження спектра амплітуд $b(i\vartheta_x, i\vartheta_y)$ є прямим Фур'є-перетворенням, знаходження

ж самої функції $B(x,y)$ за її спектром є зворотним Фур'є-перетворенням.

Неперіодичну функцію $B(x, y)$ можна представити сумою нескінченно великого числа нескінченно малих гармонійних складових, нескінченно близьких по частоті, тому спектр такої неперіодичної функції є суцільним і характеризується спектральною щільністю амплітуд [28].

Комплексна спектральна щільність яскравості (або освітленості) несе в собі повну інформацію про процес - як амплітудну, так і фазову. Під спектром амплітуд функції $B(x,y)$ розуміють модуль комплексного спектра $b(\vartheta_x, \vartheta_y) = |b(i\vartheta_x, i\vartheta_y)|$. Просторово-частотні спектри деяких стандартних сигналів приведені в таблиці 4.1.

У реальних умовах одиничні об'єкти випромінюють на фоні не стаціонарних, а флуктуючих полів, оскільки реальний фон в більшості випадків складається із різних природних утворень об'єктів, випромінювання яких розподілені в просторі випадковим чином. Тому розподіл яскравості ландшафту (фону) у просторі є випадковою двовимірною функцією координат x та y . Найбільш використовуваними характеристиками випадкових функцій є математичне сподівання, дисперсія й автокореляційна функція.

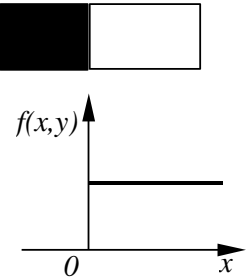
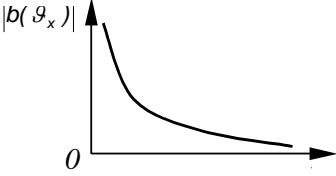
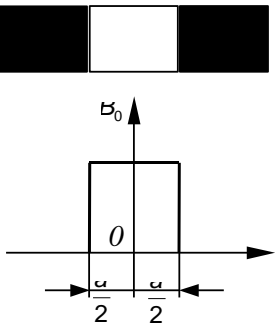
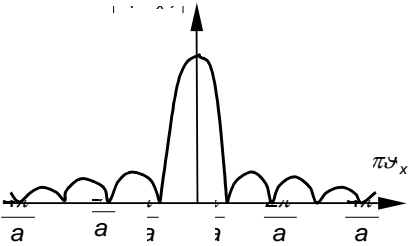
На практиці часто використовують наближене представлення сигналів потоків випромінювання фону у вигляді двовимірних випадкових функцій, що відповідають умовам стаціонарності й ергодичності. При цьому істотно спрощується математичний апарат, що використовується для опису характеристик цих функцій [28].

Властивість стаціонарності полягає у тому, що характеристики не залежать від того, з якої точки починається вимір фону, тобто статистичні характеристики стаціонарної випадкової функції залишаються постійними при зміні набору реалізацій, використаних для їхнього одержання. Випадкова функція є ергодичною, якщо будь-яка її реалізація при достатній тривалості має ті самі статистичні характеристики, тобто характеристики випадкової функції можуть бути отримані по

одній досить протяжній реалізації без усереднення по різних реалізаціях.

Таблиця 4.1

Просторово-частотні спектри сигналів

Сигнал $B(x, y)$	Спектр $b(\vartheta_x, \vartheta_y)$
 <p>The diagram shows a rectangular signal $f(x,y)$ that is constant for $x > 0$ and zero for $x < 0$. Below it, the magnitude spectrum $b(\vartheta_x)$ is shown as a curve that starts at a maximum value at $\vartheta_x = 0$ and decays as ϑ_x increases.</p>	$b(\vartheta_x) = \frac{1}{2\pi\vartheta_x} e^{-i\frac{\pi}{2}}$ 
 <p>The diagram shows a rectangular signal B_0 centered at $x=0$ with a width of a. Below it, the magnitude spectrum is shown as a central peak with smaller side lobes, characteristic of a sinc function.</p>	$b(\vartheta_x) = B_0 a \frac{\sin \pi \vartheta_x a}{\pi \vartheta_x a}$ 

Математичне сподівання $m(x, y)$ випадкової двовимірної функції яскравості $B(x, y)$ являє собою середню функцію, поблизу якої різним способом змінюються конкретні реалізації випадкової функції

$$m(x, y) = M[B\mu(x, y)], \mu = 1, 2, 3, \dots, n,$$

де M - символ усереднення; μ - номер реалізації; n - кількість реалізацій.

Дисперсія характеризує ступінь розкидання випадкової функції щодо її математичного сподівання, тобто

$$D = \sigma^2 = R(0) = \frac{1}{l_x l_y} \int_{-0.5l_x}^{0.5l_x} \int_{-0.5l_y}^{0.5l_y} [B(x, y)]^2 dx dy,$$

де D - дисперсія; σ - середньоквадратичне значення випадкової функції; $R(0)$ - значення функції автокореляції при

$$\Delta x = 0, \Delta y = 0.$$

Автокореляційна функція показує ступінь зв'язку між собою сусідніх точок двовимірної випадкової функції (у даному випадку функції яскравості $B(x, y)$), що має координати x, y та $x + \Delta x, y + \Delta y$. Вираз автокореляційної функції для стаціонарної ергодичної випадкової функції $B(x, y)$ має вигляд

$$R(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{l_x l_y} \int_{-0.5l_x}^{0.5l_x} \int_{-0.5l_y}^{0.5l_y} B(x, y) B(x + \Delta x, y + \Delta y) dx, dy.$$

Просторово-частотні властивості стаціонарних випадкових процесів характеризуються так званим спектром Хінчина-Вінера або просторово-частотним спектром дисперсій, що виражає залежність спектральної щільності дисперсії випадкової функції від просторової частоти. Для стаціонарних ергодичних випадкових сигналів спектр Хінчина-Вінера має вигляд [28]

$$S(\vartheta_x, \vartheta_y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} R(\Delta x, \Delta y) e^{-2\pi i(\vartheta_x \Delta x + \vartheta_y \Delta y)} dx dy.$$

Справедливо також і зворотне перетворення для виразу

$$R(\Delta x, \Delta y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} S(\vartheta_x, \vartheta_y) e^{2\pi i(\vartheta_x \Delta x + \vartheta_y \Delta y)} dx dy.$$

Зв'язок спектра Хінчина-Вінера $S(\vartheta_x, \vartheta_y)$ з амплітудним просторово-частотним спектром $b(\vartheta_x, \vartheta_y)$ випадкового ергодичного процесу виражається співвідношенням

$$S(\vartheta_x, \vartheta_y) = \frac{1}{l_x l_y} [b(\vartheta_x, \vartheta_y)]^2,$$

де l_x, l_y - довжина реалізації по осях x та y .

Автокореляційна функція і спектр променистості Хінчина-Вінера є усередненими характеристиками і не несуть інформації про фазові співвідношення між спектральними складовими, які визначаються конкретним зображенням фону. Як приклад на рис. 4.4, *a* показана автокореляційна функція зображення лісового масиву, а на рис. 4.4, *б* - його одномірний спектр Хінчина-Вінера.

З якісного аналізу спектрів оптичних сигналів, приведеніх у таблиці 4.1, а також ряду інших сигналів впливає:

Низькочастотні складові просторово-частотного спектра несуть основну інформацію про великі розподіли яскравості, великі деталі і рівномірні ділянки у зображенні;

середньочастотні складові спектрів сигналів мають велике значення для правильного тоновідтворення, а високочастотні складові відіграють основну роль при відтворенні дрібних деталей, різких переходів і контурів зображень;

просторові сигнали, верхні частоти яких відтворюються без викривлень, а середньочастотні складові ослаблені, будуть створювати зображення зі зменшеною кількістю градацій;

якщо низькі і середні частоти сигналів відтворюються без викривлень, а високочастотні складові ослаблені, то в отриманих зображеннях будуть погано передані дрібні деталі і різкі границі, що еквівалентно зображенням з низькою роздільною здатністю.

4.4. Передаточні характеристики оптичних систем

Тракт проходження оптичного сигналу (починаючи від об'єкта випромінювання, середовища між об'єктом та оптичним

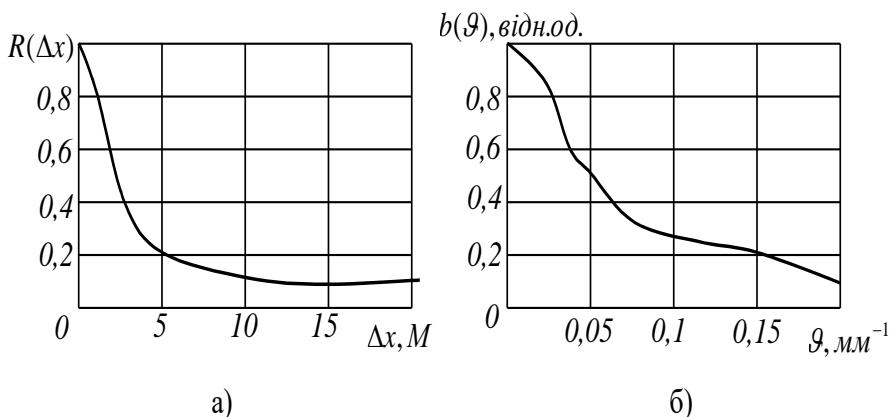


Рис. 4.4. Автокореляційна функція (а) та одновірний спектр Хічина-Вінера (б) зображення лісового масиву

приладом і включаючи перетворюючий сигнал, елементи самого приладу аж до трансформації сигналу в зображення, розглянуте або оком оператора, або автоматом, що аналізує,) можна умовно представити складеним з окремих послідовно з'єднаних оптичних ланок. І хоча кожна передаточна ланка при такому представленні необхідна для того, щоб еквівалентно відобразити якийсь визначений фізичний вплив на оптичний сигнал тієї або іншої ділянки - тракту, загальним для всіх цих ланок є те, що кожне з них впливає на сигнал незалежно від впливу інших елементів тракту [28].

Представимо кожен передаточну ланку у вигляді прямокутника (рис. 4.5), де індексами $x_{c.вх}$ та $x_{c.вих}$ позначено сигнали на вході і виході ланки.

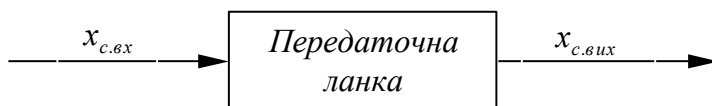


Рис. 4.5. Узагальнене представлення передаточної ланки

Для прикладу розглянемо структурну схему проходження інформації в фотографічній системі (рис. 4.6). Як видно з цього рисунка, ланка 2 характеризує вплив шару атмосфери на оптичний сигнал, 3 - враховує вплив специфічних умов роботи фотоапарата (зсув і вібрації), 4 і 5 - характеризують безпосередньо фотоапарат і фотопроцес, ланка 6 враховує обмежені можливості одержувача інформації при спостереженні зображень.

Така розбивка системи на окремі ланки умовна і залежить від того, вплив яких факторів необхідно врахувати. При цьому враховується лише еквівалентний вплив на сигнал того або іншого фактора незалежно від його фізичного змісту. Передаточні властивості ланки оцінюються порівнянням сигналів на його виході і вході.

У загальному випадку до сигналів, що несуть корисну інформацію, можуть додаватися сторонні заважаючі сигнали, які називаються перешкодами. Сигнали перешкод поступають на вхід або вихід відповідної ланки, де вони підсумовуються з корисним сигналом.

Прикладом просторового двополюсника без джерела перешкод є найпростіша оптична система у вигляді лінзи (рис. 4.7). Оптична система перетворює розподілення яскравості в площині об'єкта $B(x, y)$ у розподілення освітленості в площині зображення $E(x', y')$, фізична ж природа інформації при цьому не змінюється. Координати в площині зображення x' та y' зв'язані з координатами в площині об'єкта x та y співвідношенням

$$x = x'l/L; y = y'l/L,$$

де l – відстань від головної площини об'єктива до площини зображення; L – відстань від об'єкта до головної площини об'єктива.

Прикладом просторового двополюсника з джерелами перешкод і перетворенням фізичної природи інформації може служити фотографічна плівка.

Розподіл яскравості сигналу на плівці перетвориться у відповідний розподіл щільності проявленого зображення, при цьому

до корисного сигналу додається структура, що заважає, обумовлена зернистою будовою плівки.

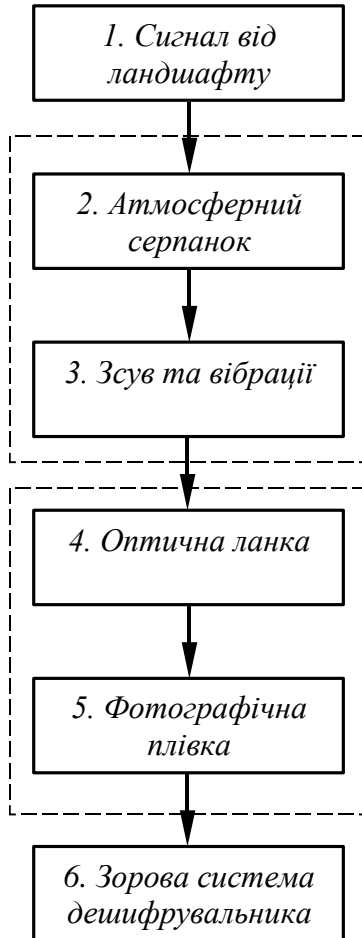


Рис.4.6. Структурна схема проходження інформації в фотосистемі

Однією з характеристик передаточної ланки є залежність амплітуди сигналу на виході ланки від її значення на вході (амп-

літудна або статична характеристика). Якщо амплітудна характеристика має вигляд

$$x_{c.вих} = ax_{c.вх},$$

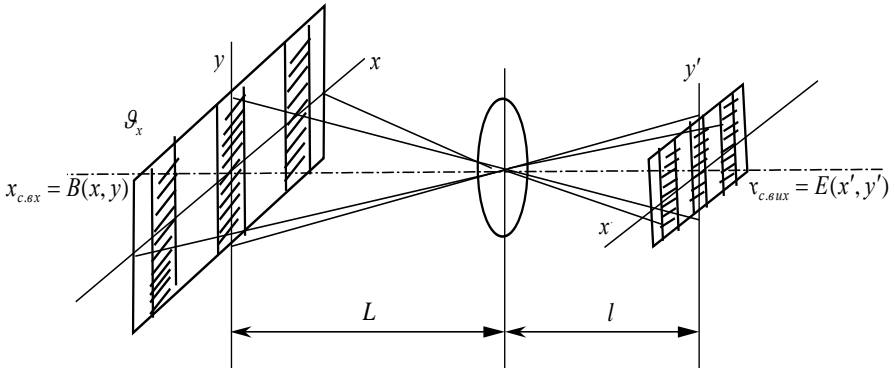


Рис. 4.7. Найпростіша оптична система та перетворення нею координат сигналу

де a - постійний коефіцієнт, то вона називається лінійною. Система лінійна, якщо до неї можливо застосувати принцип суперпозиції (накладення). Це визначення є найбільш загальним.

У теорії регулювання і теорії зв'язку існує кілька методів опису передаточних характеристик лінійних ланок і систем, заснованих на відгуку (реакції) ланки або системи на вплив спеціального виду сигналу. Найбільш розповсюдженими передаточними характеристиками є: імпульсна функція або функція ваги - реакція на одиничний імпульс (δ - функцію), перехідна функція - реакція системи на одиничний стрибок, частотна передаточна функція - залежність амплітуди і фази сигналу на виході системи від його частоти (при незмінній амплітуді і фазі на його вході). При аналізі оптичних систем цим характеристикам відповідають функція розсіювання точки і лінії, перехідна функція системи (або прикордонна крива) і комплексна оптична передаточна функція (ОПФ) [28].

Розглянемо ці характеристики на прикладі найпростішої оптичної системи (див. рис. 4.7), а потім поширимо їх на загальний

випадок просторової передаточної ланки. Оптична система перетворює розподіл яскравості в площині об'єктиву в розподіл освітленості в площині зображення. При цьому відбуваються відповідні зміни масштабу в розподілі освітленості.

Функція розсіювання точки або імпульсна функція характеризує реакцію оптичної системи на імпульс випромінювання, тобто на просторову δ -функцію (або на точкове джерело). Реакцією оптичної системи на випромінювання точкового джерела є розподіл освітленості, що створений нею в площині зображення цього джерела. Таким чином, функція розсіювання точки описує розподіл освітленості в зображенні точки, що створюється оптичною системою. Функція розсіювання точки визначається як відношення освітленості в площині зображення до сили випромінювання I точкового джерела, що поступає на вхід оптичної системи

$$h(x, y) = E_{\delta}(x, y) / I,$$

де $E_{\delta}(x, y)$ - розподіл освітленості в зображенні точкового джерела.

Оскільки функцію розсіювання точки можна визначити для будь-якої точки площини зображення, то цю функцію звичайно представляють у новій системі координат $h(\xi, \eta)$, де ξ, η - координатні осі, відповідно паралельні осям x та y . Однак центр системи координат ξ та η завжди сполучений з центром розсіювання в зображенні точки, що може бути розташоване в будь-якій точці площини. Якщо функція розсіювання точки сама по собі симетрична, то вона симетрична відносно початку осей координат ξ та η і її можна охарактеризувати одномірним розрізом.

Приклад такого представлення симетричної функції розсіювання точки показаний на рис. 4.8. При зміні яскравості об'єкта за двома координатами освітленість, що створюється оптичною системою в зображенні такого об'єкта має такий вигляд

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x - \xi, y - \eta) h(\xi, \eta) d\xi d\eta.$$

Цей вираз відомий під назвою інтеграла згортки. Для того, щоб користуватися цим виразом, необхідно перерахувати освітленість з системи координат (x, y) площини об'єктів в освітленість у системі координат (x', y') площини зображення за формулами

$$x' = xf' / L; y' = yf' / L,$$

де f' - фокусна відстань об'єктива; L - відстань від об'єкта до головної площини об'єктива.

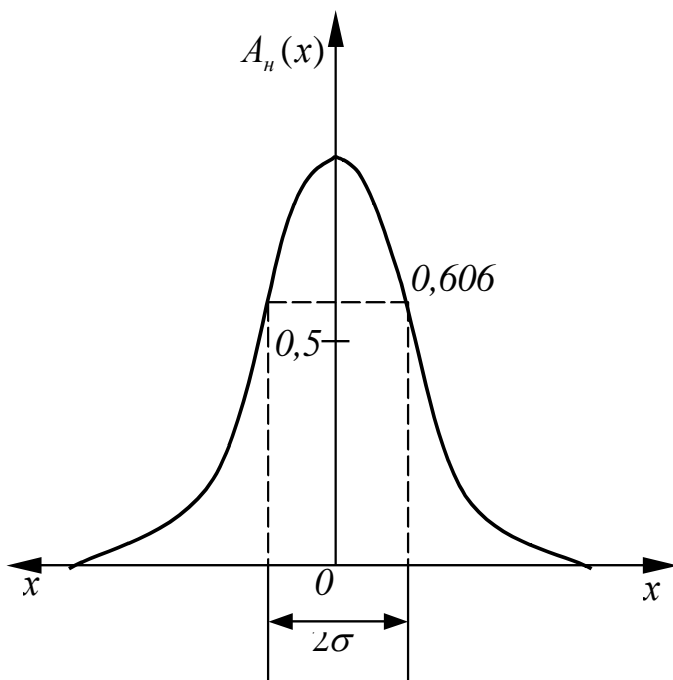


Рис. 4.8. Одновимірний розріз симетричної функції розсіювання точки

При розгляді одновимірної картини розподілення освітленості в зображенні можна замість функції розсіювання точки користуватися функцією розсіювання лінії. Така функція описує розподіл освітленості в зображенні лінії, створюваною оптичною

системою (рис. 4.9). Функція розсіювання лінії $A(\xi)$ зв'язана з функцією розсіювання точки $h(\xi, \eta)$ співвідношенням

$$A(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\xi, \eta) d\eta.$$

Якщо система побудови зображення

лінійна, то зображення будь-якого об'єкта можна одержати відповідним додаванням функцій розсіювання всіх точок і всіх ліній, що спільно утворюють об'єкт.

Перехідною функцією називається реакція системи на сигнал у вигляді одиничного стрибка [28].

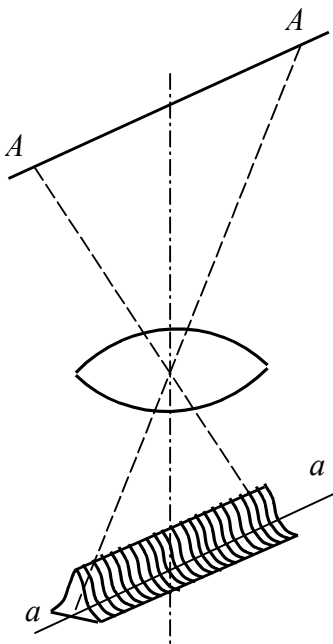


Рис. 4.9. Функція розсіювання лінії

Якщо в площині об'єктів є різка границя між світлим та цілком темним полем, так названий «крайовий слід», то передаточна ланка залежно від своєї якості згладить цю границю, оскільки зображення точок останньої буде мати кінцеві розміри.

У оптиці функцію, що описує розподіл освітленості в зображенні «крайового сліду», називають перехідною функцією або прикордонною кривою [28]. Оскільки у випадку передачі крайового сліду розглянутий сигнал ставиться по одній координаті, то для знаходження елементарної реакції системи при передачі нею різкої границі поля випромінювання можна використовувати функцію розсіювання лінії. Побудуємо перехідну функцію (прикордонну криву) підсумовуванням елементарних функцій розсіювання лінії $A(\xi)$, як це показано на рис. 4.10.

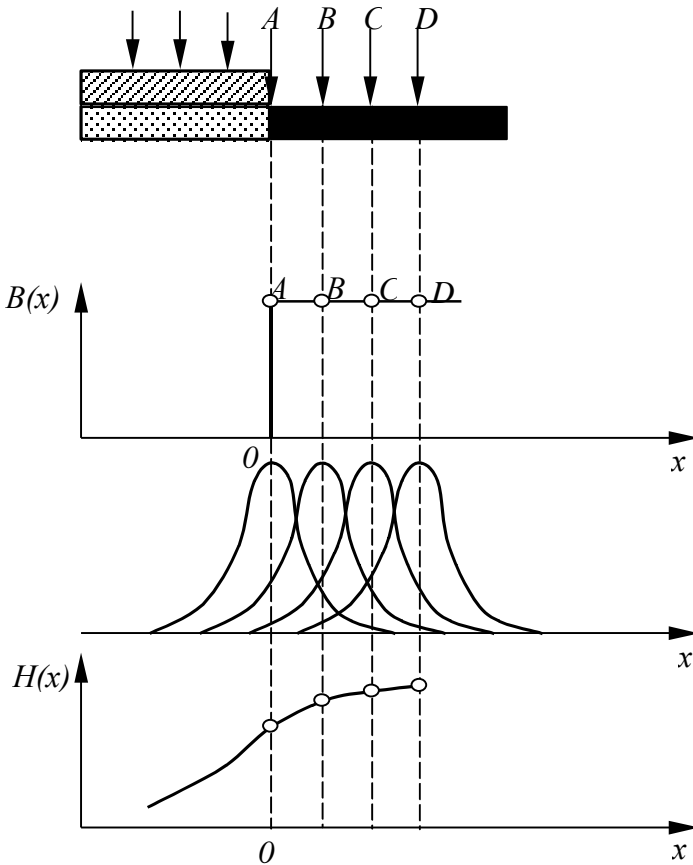


Рис. 4.10. Побудова прикордонної кривої $H(x)$ підсумовуванням елементарних функцій розсіювання $A(x)$

Нормоване розподілення освітленості в кожній точці зображення напівплощини описується виразом

$$H(x) = \int_{-\infty}^x A(\xi) d\xi,$$

де $H(\xi)$ - перехідна функція (прикордонна крива) оптичної системи.

З виразу (3.17) випливає, що функція розсіювання лінії є похідною від перехідної функції системи, тобто $A(x) = dH(x)/dx$ (ξ - поточне значення аргументу в системі координат, де вісь ξ збігається з віссю координат x). Перехідна функція (прикордонна крива) так само, як і функція розсіювання точки або лінії, повністю описує передаточні властивості двовимірних ланок. Приклад типової прикордонної кривої показаний на рис. 4.11.

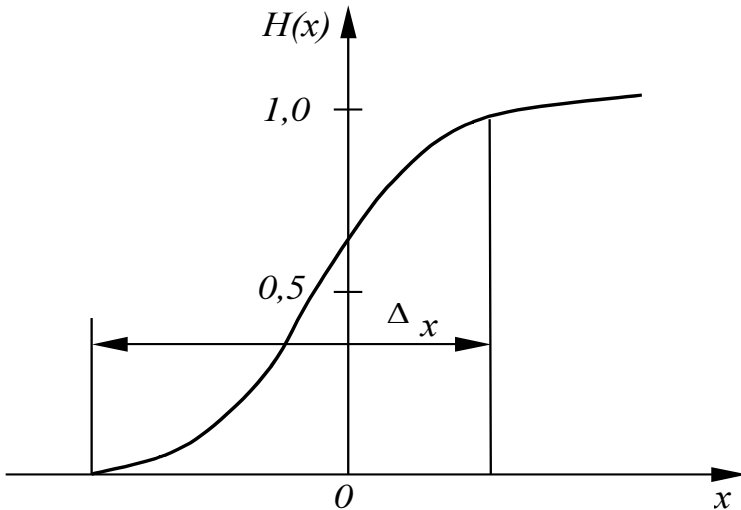


Рис. 4.11. Приклад прикордонної кривої

Розглянуті передаточні функції є реакцією двовимірних ланок на спеціальні просторові сигнали і характеризують передаточні властивості цих ланок у природній системі координат площини x, y . Якщо сигнали представлені у вигляді їхніх

просторово-частотних спектрів, то передаточні властивості двовимірних ланок характеризуються їх оптичними передаточними функціями (ОПФ). Оптична передаточна функція $W(i\mathcal{G}_x, i\mathcal{G}_y)$ визначається як відношення комплексного амплітудного спектра сигналу на виході ланки до комплексного амплітудного спектра сигналу на його вході [28]:

$$W(i\mathcal{G}_x, i\mathcal{G}_y) = \frac{b_{c.вих}(i\mathcal{G}_x, i\mathcal{G}_y)}{b_{c.вх}(i\mathcal{G}_x, i\mathcal{G}_y)}.$$

У загальному випадку комплексні спектри сигналів можна записати у вигляді

$$b_c(i\mathcal{G}_x, i\mathcal{G}_y) = |b_c(\mathcal{G}_x, \mathcal{G}_y)| e^{i\varphi_c(\mathcal{G}_x, \mathcal{G}_y)},$$

де $|b_c(i\mathcal{G}_x, i\mathcal{G}_y)|$ - модуль комплексного спектра або амплітудний спектр сигналу; $\varphi_c(\mathcal{G}_x, \mathcal{G}_y)$ - фазовий спектр сигналу.

Тоді, за аналогією, вираз можна представити у вигляді

$$W(i\mathcal{G}_x, i\mathcal{G}_y) = W(\mathcal{G}_x, \mathcal{G}_y) e^{i\varphi_c(\mathcal{G}_x, \mathcal{G}_y)},$$

де $W(\mathcal{G}_x, \mathcal{G}_y)$ - модуль оптичної передаточної функції, що є просторовою амплітудно-частотною характеристикою і визначає залежність зміни амплітуди сигналу на виході передаточної ланки від просторової частоти. Однією з характеристик процесу передачі оптичною системою просторових частот є коефіцієнт зміни амплітуди просторової синусоїди $W(\mathcal{G}) = k_u / k_o$, де k_u, k_o - контрасти в площині зображення та площині об'єктів відповідно. Ці контрасти визначаються виразом [28]:

$$k = \frac{(L_{max} - L_{min})}{(L_{max} + L_{min})}.$$

З наведених виразів випливає, що амплітудно-частотна характеристика показує залежність коефіцієнта передачі модуляції від просторової частоти. Для цієї характеристики використовують термін “Функція передачі модуляції” (ФПМ) або “Частотно-контрастна характеристика” (ЧКХ).

Оптична передаточна функція є аналогом передаточної функції в теорії автоматичного регулювання. Особливо широко використовується для оцінки передаточних властивостей двовимірних ланок в оптиці, фотографії, телебаченні, ІЧ-техніці модуль цієї функції $W(\vartheta_x, \vartheta_y)$.

Приклад типової ФПМ оптичної системи показаний на рис. 4.12.

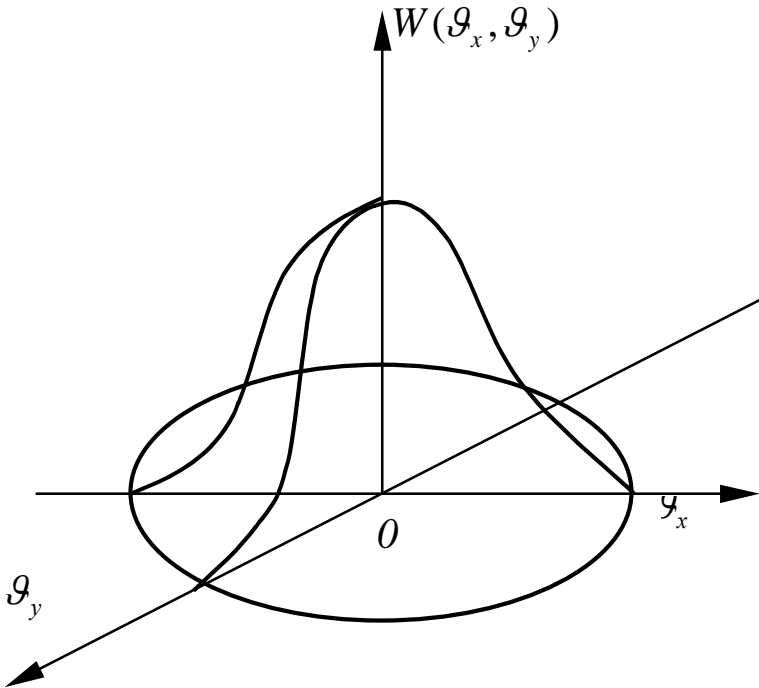


Рис. 4.12. Приклад ФПМ оптичної системи

Оскільки розподіл освітленості в зображенні описується інтегралом згортки, між оптичною передаточною функцією і функцією розсіювання точки $h(x, y)$ існує однозначний зв'язок: оптична передаточна функція і функція розсіювання точки виходять одна з одної прямим і зворотним Фур'є-перетворенням [28]:

$$W(i\mathcal{G}_x, i\mathcal{G}_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-i2\pi(\mathcal{G}_x x + \mathcal{G}_y y)} dx dy;$$

$$h(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(i\mathcal{G}_x, i\mathcal{G}_y) e^{i2\pi(\mathcal{G}_x x + \mathcal{G}_y y)} dx dy.$$

Якщо функції $h(x, y)$ і $W(i\mathcal{G}_x, i\mathcal{G}_y)$ мають кругову симетрію щодо нульової точки, то можна використовувати одномірний варіант формул:

$$W(i\mathcal{G}_x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) e^{-i2\pi\mathcal{G}_x x} dx;$$

$$A(x) = \int_{-\infty}^{\infty} W(i\mathcal{G}_x) e^{i2\pi\mathcal{G}_x x} dx.$$

Використання функції $A(x)$ замість $h(x, y)$ у формулах доцільніше, оскільки методика виміру $A(x)$ забезпечує більш високу точність, ніж вимір $h(x, y)$.

Розглянемо зв'язок між функцією розсіювання ліній $A(x)$ і функцією передачі модуляції $W(\mathcal{G}_x)$ для одномірного випадку. Для цього представимо оптичну передаточну функцію як будь-яку комплексну величину у вигляді суми дійсної і мнімої частин [28]:

$$W(i, \mathcal{G}_x) = W_{\cos}(\mathcal{G}_x) + iW_{\sin}(\mathcal{G}_x),$$

де $W_{\cos}(\mathcal{G}_x)$, $W_{\sin}(\mathcal{G}_x)$ - дійсна і мніма частотні характеристики відповідно.

Розклавши $e^{i2\pi\mathcal{G}_x x}$ у вираз за формулою Ейлера, одержимо

$$W(i, \mathcal{G}_x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \cos 2\pi\mathcal{G}_x x dx + i \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \sin 2\pi\mathcal{G}_x x dx,$$

тобто

$$W_{\cos}(\mathcal{G}_x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \cos 2\pi\mathcal{G}_x x dx,$$

$$W_{\sin}(\mathcal{G}_x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \sin 2\pi \mathcal{G}_x x dx,$$

ФПМ як модуль функції $W(i \mathcal{G}_x)$ визначається за формулою

$$W(\mathcal{G}_x) = \sqrt{W_{\cos}^2(\mathcal{G}_x) + W_{\sin}^2(\mathcal{G}_x)}$$

Ці співвідношення показують зв'язок між ФПМ і функцією розсіювання лінії.

Дві функції розсіювання лінії і відповідні їм ФПМ зображені на рис. 4.13. Як видно з рисунка, при розширенні функції розсіювання діапазон просторових частот у ФПМ відповідно звужується.

Вираз для визначення одномірної ФПМ має вигляд

$$\varphi(\mathcal{G}_x) = \operatorname{arctg} \frac{W_{\sin}(\mathcal{G}_x)}{W_{\cos}(\mathcal{G}_x)}.$$

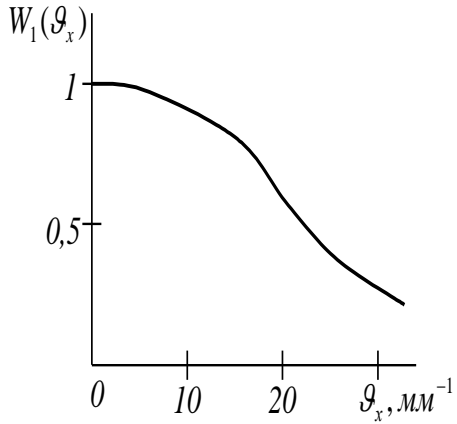
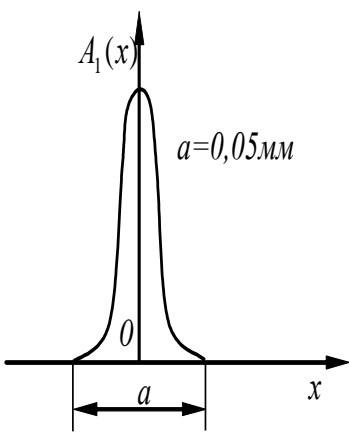
Функція передачі фази (ФПФ) показує залежність фазового зсуву просторових синусоїдальних складових від частот цих складових. ФПФ характеризує здатність двовимірної передаточної ланки зберігати координати окремих точок у зображенні щодо координат цих точок в об'єкті. Приклад ФПФ показаний на рис. 4.14.

Характеристика 3 збігається з віссю абсцис і відповідає відсутності фазових зсувів, характеристика 2 відповідає лінійному зсуву фаз, а 1 - нелінійному. У загальному випадку крива ФПФ може мати досить складну форму. Таким чином, ФПМ і ФПФ цілком визначають оптичну передаточну функцію, тобто передаточні властивості ланки [28].

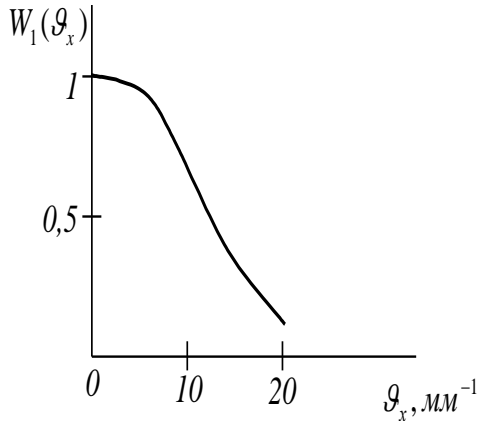
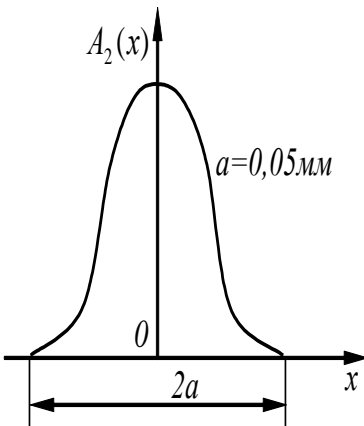
При розгляді впливу ФПФ двовимірних лінійних ланок на побудову зображень необхідно мати на увазі, що неспотвореному відтворенню зображень відповідає область просторових частот, у межах якої ФПФ тотожно дорівнює нулю.

У такому випадку під відсутністю викривлень розуміється точна відповідність первісних координат об'єктів у різних точках їхньому зображенню. Якщо ж перед системою не ставиться задача точної передачі координат об'єктів, то при розрахунку її передаточних властивостей ФПФ можна не враховувати.

На рис. 4.15 показана залежність зміни відносного контрасту просторової синусоїди на виході передаточної ланки від значення просторової частоти. Типова ФПМ об'єктива зображена на рис. 4.16.



a



б

Рис.4.13. Функції розсіювання лінії і відповідні їм ФПМ: *a* - система з малими абераціями; *б* - система з великими абераціями

Відношення K_u / K_o характеризує зменшення контрасту в зображенні у порівнянні з контрастом в об'єкті по мірі росту просторових частот.

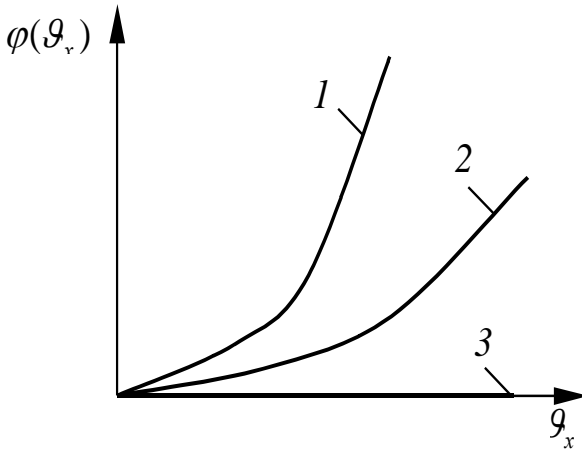


Рис. 4.14. До пояснення прикладу ФПФ

У такий спосіб за допомогою оптичної передаточної функції спектр освітленості зображення $b_3(i\xi_x, i\xi_y)$ знаходиться як добуток спектра яскравості об'єкта $b_{об}(i\xi_x, i\xi_y)$ і оптичної передаточної функції $W_{oc}(i\xi_x, i\xi_y)$:

$$b_3(i\xi_x, i\xi_y) = b_{об}(\xi_x, \xi_y) * W(i\xi_x, i\xi_y).$$

Формула справедлива для випадку, коли всі просторові частоти розглядаються в одній площині [28].

При послідовному з'єднанні декількох передаточних ланок сигнал на їхньому виході визначається співвідношенням

$$b_{c.вих}(i\xi_x, i\xi_y) = b_{c.вх}(i\xi_x, i\xi_y) \prod_{n=1}^{n=m} W_n(i\xi_x, i\xi_y),$$

де m – кількість послідовно з'єднаних ланок.

Структурна схема, що реалізує формулу, зображена на рис. 4.17, де показано послідовне з'єднання просторово-частотних ланок.

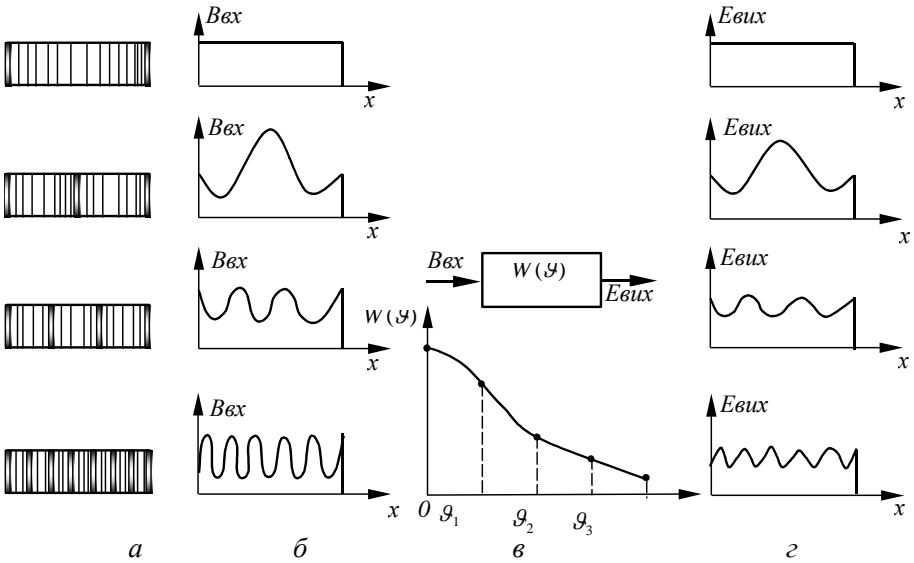


Рис. 4.15. До пояснення зміни відносного контрасту на виході передаточної ланки: *a* – розподілення яскравості об'єкта; *б* – графік зміни яскравості об'єкта; *в* – передаточна ланка та його характеристика; *г* – графік розподілення яскравості в зображенні об'єкта

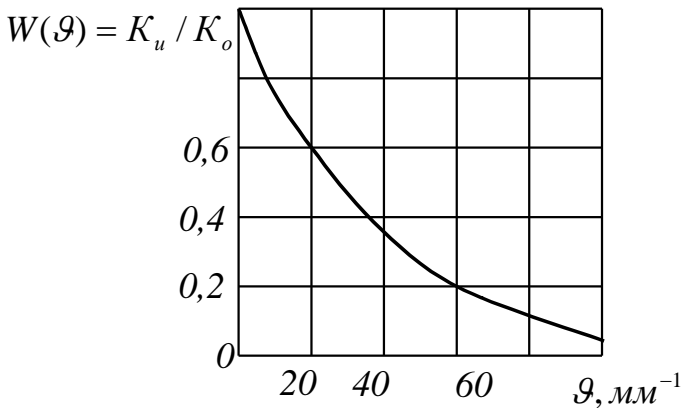


Рис. 4.16. Приклад ФПМ об'єктива “Індустар - 61”

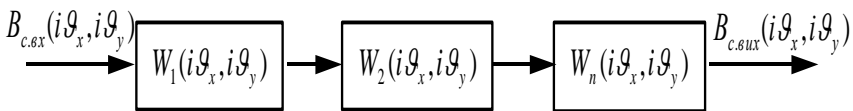


Рис.4.17. Послідовне з'єднання просторово-частотних ланок

Перераховані передаточні функції (просторова імпульсна, просторова перехідна, оптична або еквівалентна їй сукупність ФПМ та ФПФ ланок та систем) несуть інформацію про передаточні властивості двовимірних ланок і однозначно перераховуються одна в другу. Доцільність вибору тієї або іншої функції для оцінки передаточних властивостей ланки залежить від умов конкретної задачі [28].

Усі розглянуті вирази застосовуються до двовимірних систем побудови зображень для випадку, коли ці системи лінійні, тобто інтенсивність освітленості в кожній точці зображення можна одержати додаванням освітленостей від різних незалежних джерел.

Останнє справедливе, якщо променевий потік, що несе інформацію про зображення, створюється джерелом некогерентного випромінювання. Для випадку когерентних джерел випроміню-

вання підсумовувати необхідно не освітленості в зображенні (тобто квадратичні функції амплітуди електромагнітного коливання), а комплексні амплітуди вектора електромагнітного поля. У цьому випадку замість функцій, що характеризують яскравість і освітленість, використовуються комплексні вирази для амплітуди хвилі, що виходить від точкового джерела, і комплексний коефіцієнт передачі цієї амплітуди.

4.5. Визначення частотно-контрастної характеристики об'єктива за тест-об'єктами

Останнім часом для оцінки якості зображення широко використовують частотно-контрастну характеристику (ЧКХ), що виражає залежність контрастності зображення, яке дає об'єктив, від величини яскравості окремих деталей самого об'єкта.

Для визначення ЧКХ використовують спеціальні тест-об'єкти - прямокутні решітки з східчастою різницею яскравостей (рис. 4.18) і синусоїдні решітки з плавною зміною яскравості.

Метод визначення ЧКХ полягає в тому, що за допомогою випробувального об'єктива дістають зображення тест-об'єкта в площині скануючої щілини, за якою розміщений фотоелемент, з'єднаний з самописцем. За допомогою цього приладу визначають освітленість у зображенні штрихів E_{max} і проміжків E_{min} . Графік зміни освітленості в зображенні тест-об'єкта (рис. 4.19) наочно показує залежність контрастності зображення від ширини деталей об'єкта (від просторової частоти об'єкта).

Частотно-контрастну характеристику об'єктива визначають за формулою

$$T(w) = \frac{K_{зобр}}{K_{об}},$$

де T - коефіцієнт передачі контрастності; w - просторова частота решітки; $K_{зобр}$, $K_{об}$ - контрастність у зображенні об'єкта і контрастність об'єкта.



Рис. 4.18. Тест-об'єкт із східчастою різницею яскравостей:
 L - яскравість; w - просторова частота решітки

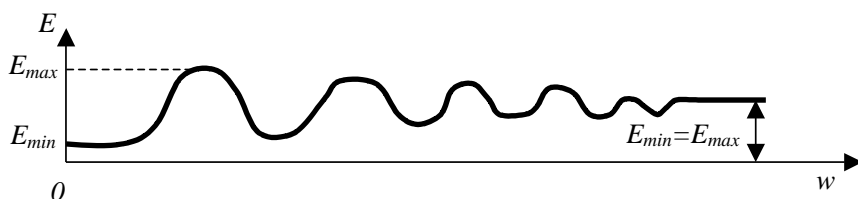


Рис. 4.19. Графік зміни освітленості в зображенні
 тест-об'єкта

За знайденими даними будують графіки залежності коефіцієнта передавання контрастності T від просторової частоти решітки w .

З графіків ЧКХ двох об'єктивів 1 і 2 (рис.4.20) видно, що, маючи однакову роздільну здатність R , вони дають різні за якістю зображення: об'єктив 1 створює контрастність зображення, яка більше відповідає контрастності об'єкта, ніж об'єктив 2.

Неоднорідність оптичного скла, похибки чистоти обробки поверхонь лінз, світлорозсіяння від поверхонь лінз, порушення мікрогеометрії поверхонь лінз внаслідок їх просвітлення, похибки центрування лінз під час складання об'єктива - усі ці фактори знижують ЧКХ об'єктива, а отже, якість їх оптичного зображення.

Методика визначення ЧКХ дає можливість проконтролювати всі фактори різних стадій складного фотографічного процесу, які впливають на якість зображення, і, перемноживши їх, знайти наскрізну ЧКХ фотопроцесу.

У будь-якому разі різкість зображення, яке спостерігає людина, залежить від якості об'єктива і гостроти зору, тобто від роздільної здатності ока людини. Різкість зображення - це чіткість меж між ділянками, що мають різну густину.

Будь-який, навіть найдосконаліший, об'єктив внаслідок наявності в ньому залишкових аберацій і дифракційних явищ світла проектує точки, з множини яких складається об'єкт знімання, не в точки, а кружечки деякого діаметра – w , так звані кружечки розсіяння (або диски нерізкості). Оскільки роздільна здатність ока людини становить одну кутову хвилину, то воно з відстані

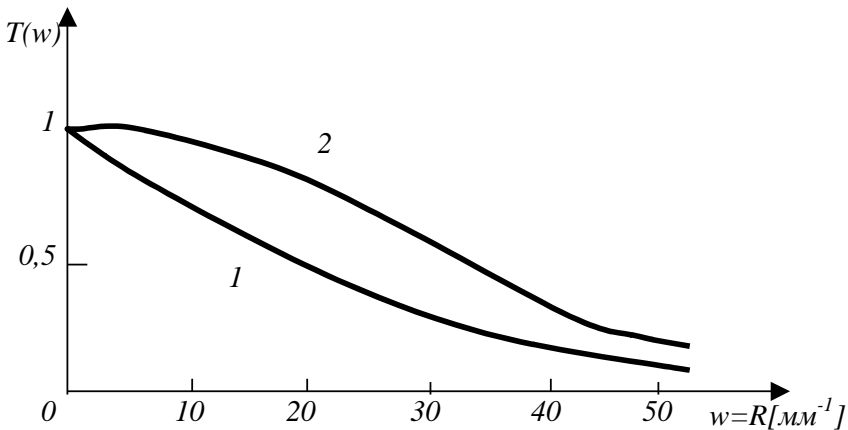


Рис. 4.20. Графіки ЧКХ двох об'єктивів з однаковою роздільною здатністю

найкращого зору (25-30 см) сприймає предмети (точку або сукупність точок), діаметр яких не перевищує 0,1 мм, у вигляді точки. Враження нерізкості не виникає.

Встановлено, що предмет будь-якої величини з відстані, яка перевищує розміри цього предмета в 3500 разів, людина бачить у вигляді точки. Виходячи з роздільної здатності ока людини, встановлено такі розміри кружечків розсіяння на фотонегативах за умови, що з них можна одержати різкі відбитки:

1) для негативів розміром 6×6 см і більше діаметр кружечка розсіювання не повинен перевищувати 0,1 мм, оскільки ці негативи допускають контактний друк, а відбитки з них розглядають з відстані найкращого зору;

2) для малоформатних негативів діаметр кружечка розсіювання не повинен перевищувати 0,03-0,05 мм, оскільки для розгляду відбитків, виготовлених з таких негативів, їх збільшують як мінімум у 3 рази.

При значних збільшеннях фотокопій кружечок розсіювання може перевищити зазначені границі, оскільки нерізкість, що виникає в цьому разі, компенсується збільшенням відстані, з якої розглядають відбиток.

4.6. Визначення ФПМ оптичної системи з використанням рівняння закону Гаусса

Функція розсіювання лінії, що зв'язана з прикордонною кривою рівнянням

$$W_{\Pi}(\vartheta) = \sqrt{W_{\Pi \sin}^2(\vartheta) + W_{\Pi \cos}^2(\vartheta)}$$

містить у собі всю інформацію про образотворчі властивості досліджуваної ділянки поля зору оптичної системи. Використовуючи пряме Фур'є-перетворення, за відомою функцією розсіювання лінії можна обчислити ФПМ за допомогою рівняння [28]

$$W(i\vartheta_x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) e^{-i2\pi\vartheta_x x} dx;$$

однак при цьому потрібна велика кількість обчислень. Якщо ж функцію розсіювання апроксимувати аналітичним виразом, процес одержання ФПМ значно спрощується.

Результуючу функцію розсіювання оптичної фотосистеми з урахуванням факторів польоту з достатньою точністю можна описати законом Гаусса:

$$A(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (4.1)$$

де σ - постійна закону Гаусса.

З огляду на це і використовуючи Фур'є-перетворення, отримаємо:

$$W(\vartheta) = e^{-2\pi^2\vartheta^2\sigma^2}.$$

Дана формула показує, що ФПМ у цьому випадку однозначно визначається одним параметром - постійною закону Гаусса σ . Вираз для нормованої функції розсіювання має вигляд

$$A_n = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}};$$

при $x = \sigma$ $A_n = e^{-1/2} = 0,606$.

Значення σ можна визначити і графічно, якщо відома функцію розсіювання системи (рис. 4.21). Як видно з рис. 4.21, постійна σ відповідає половині ширини функції розсіювання на рівні 0,606 максимуму. Практично значення σ зручніше визначати за прикордонною кривою. Наприклад, прирівнявши значення функції розсіювання максимальному градієнтові нормованої прикордонної кривої (φ_{\max}) [17]

$$\varphi_{\max} = (dH / dx)_{\max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}},$$

одержимо $\sigma = 0,4 / \varphi_{\max}$.

Параметр σ можна визначити і іншим способом. Проінтегруємо ліву і праву частини рівняння (4.1), одержуємо

$$H(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (4.2)$$

При $\sigma = 1$ рівняння (4.2) переходить у рівняння Лапласа

$$H(x) = \Phi^*(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

Задаючи значення $x_1 = -1$ і $x_2 = 1$, одержуємо

$$H(x_1) = 0.16;$$

$$H(x_2) = 0.84.$$

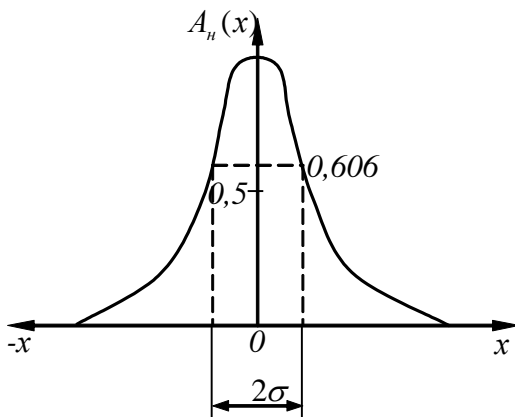


Рис. 4.21. Графік функції розсіювання системи

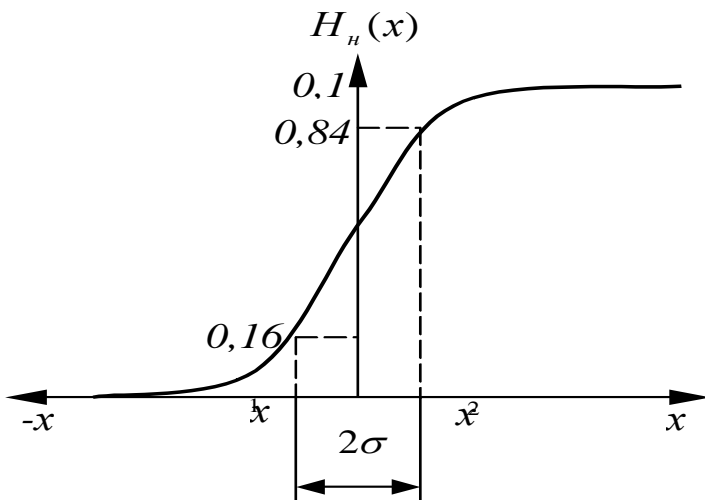


Рис. 4.22. До визначення значення σ за графіком нормованої прикордонної кривої

Таким чином, для визначення σ необхідно на графіку нормованої прикордонної кривої (рис. 4.22) відмітити точки на рівні $0,16$ і $0,84$ і спроектувати їх на вісь x .

Для більш точної апроксимації слід визначати параметр σ як способом обчислення максимального градієнта прикордонної кривої,

так і графічно за рівнями 0,16 і 0,84 нормованої прикордонної кривої. У формулу (3.41) у цьому випадку потрібно підставити середньоарифметичне з усіх отриманих значень σ .

Питання для самоконтролю

1. Пояснити поняття ФРТ.
2. Визначити поняття просторової частоти.
3. Дати визначення ЧКХ.
4. Дати визначення ФПМ.
5. Дати визначення ФПФ.
6. Як пов'язані ЧКХ, ФПМ та ФПФ?
7. Як визначити ФРТ по тест-об'єкту?
8. Як визначити ФРТ по реальному точковому об'єкту?
9. Як визначити ФРТ по реальному переходу світло-тінь об'єкта?
10. Чим відрізняються ЧКХ систем з різною роздільною здатністю?
11. Що являє собою тест-об'єкт для визначення роздільної здатності?
12. Як визначається функція розсіювання лінії?

РОЗДІЛ 5

НАЗЕМНИЙ СПЕЦІАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ПРИЙОМУ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ВИДОВОЇ КОСМІЧНОЇ РОЗВІДКИ

5.1. Загальні принципи побудови та структура наземного спеціального комплексу прийому та обробки інформації видової космічної розвідки

Наземний спеціальний комплекс (НСК) прийому та обробки інформації видової космічної розвідки є частиною спеціального комплексу видової розвідки.

5.1.1. Призначення, склад та структура НСК прийому та обробки інформації видової космічної розвідки

Комплекс являє собою спеціально організовану систему, об'єднану єдністю технологічного процесу, що містить у собі всі рівні від прийому інформації з КА до спеціальної обробки інформації на робочих місцях дешифрувальників-інтерпретаторів, де з використанням спеціалізованих обчислювальних засобів в інтерактивному режимі обробляється інформація. Обробка проводиться для отримання даних, визначених тематичним замовленням, або для формування вирішальних

правил із метою наступної автоматичної обробки великих масивів даних.

Основні функції комплексу:

- 1) планування ведення розвідки;
- 2) прийом сигналів, що поступають по широкосмуговій радіолінії зв'язку безпосередньо з КА або через супутник-ретранслятор, перетворення їх у цифрову форму;
- 3) поточна візуалізація зображень на моніторах для відбору придатних до подальшої обробки;
- 4) попередня обробка: кадрування, перетворення форматів подання (конвертування), радіометричне та геометричне корегування (нормалізація), географічна прив'язка знімків;
- 5) обробка зображень з метою покращання їх сприйняття;
- 6) розпізнавання та класифікація об'єктів на зображеннях (дешифрування);
- 7) проведення вимірів та кількісного аналізу;
- 8) оформлення звітно-інформаційних документів;
- 9) виконання тематично-орієнтованих перетворень зображень в різноманітних спектральних діапазонах та подання цих перетворень у вигляді складних синтезованих зображень у псевдокольорах;
- 10) комплексне автоматизоване дешифрування даних за сукупністю ознак;
- 11) зберігання, тиражування та доставка інформації користувачам;
- 12) забезпечення взаємодії та інформаційного обміну з наземним автоматизованим комплексом управління (НАКУ) та споживачами інформації.

Відповідно з призначенням і технологією прийому та обробки інформації, комплекс включає такі підсистеми: пункт прийому та обробки інформації та центр обробки розвідувальної інформації (рис. 5.1).

Пункт прийому та обробки інформації (ППІ), що здійснює прийом інформації від КА, її перетворення з метою відтворення зображень, оперативний перегляд, конвертування та норма-

лізацію зображень з метою зменшення викривлень, архівування зображень.

ППІ містить у собі такі основні елементи:

- 1) антенно-поворотний пристрій (АПП) з автоматизованою системою управління;
- 2) приймально-демодулюючу станцію (ПДС);
- 3) систему поточного архівування (СПА);
- 4) станцію нормалізації та конвертування (СНК);
- 5) архів ППІ, локально обчислювальну мережу, яка інформаційно поєднує всі елементи ППІ;
- 6) робочу станцію управління ППІ (РСУ ППІ);
- 7) систему зв'язку та передачі даних (СЗПД).

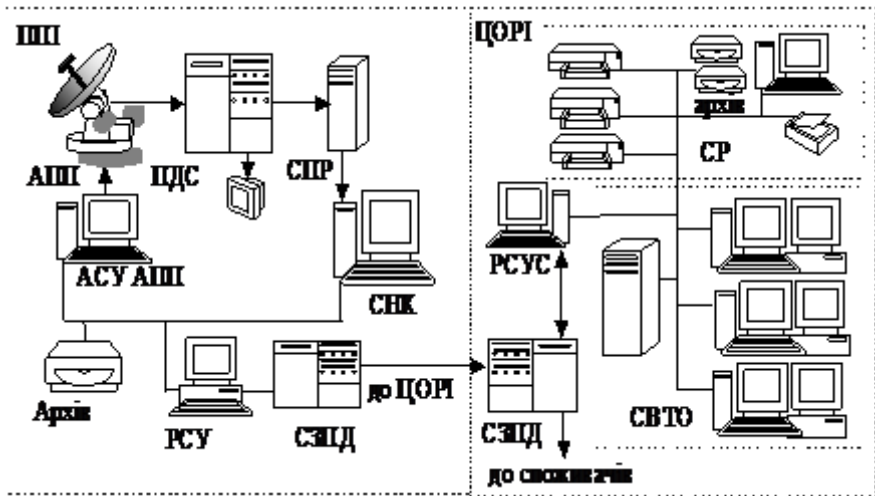


Рис. 5.1. Структура НСК

Центр обробки розвідувальної інформації (ЦОПІ) у складі таких підсистем:

- 1) система валової та тематичної обробки (СВТО), яка створена на базі програмно-технічного комплексу (ПТК) обробки аерокосмічних зображень;
- 2) система картографічного забезпечення (СКЗ) на базі географічної інформаційної системи;

- 3) система реєстрації та тиражування (СРТ), яка містить комплекс технічних засобів поліграфічного тиражування та інформаційно-пошукову систему (ПРС) з архівом;
- 4) робоча станція управління системою (РСУС);
- 5) локальна обчислювальна мережа (ЛОМ), яка інформаційно об'єднує всі елементи ЦОРІ;
- 6) система зв'язку та передачі даних (СЗПД) для зв'язку з ППІ, НАКУ і споживачами.

5.1.2. Загальні вимоги до засобів НСК

Апаратура та програмні засоби НСК повинні забезпечувати такі параметри комплексу в цілому:

- швидкість поступання інформації від КА - 16, 32, 64, 128, 256 Мбіт/с;
- вид модуляції - ОФМ, МОФМ (QPSK, SQPSK);
- прийом, обробка та реєстрація за добу до 3 сеансів знімання спецінформації з одного КА;
- мінімальний проміжок часу між сеансами зв'язку з КА - 10 хвилин;
- прийом інформації з бортової пам'яті КА, типова ємність якої становить 30 Гбайт ;
- кількість спектральних каналів датчиків в ІЧ діапазоні - до 7;
- вибіркова реєстрація на постійні носії до 10 сеансів за добу;
- технологічна обробка одного сеансу за термін не більший 10 хв на об'єкти і до 30 хв на сеанс;
- видача оперативних даних не пізніше ніж через 1,5 години (за терміновими замовленнями не пізніше 30 хв) з моменту надходження інформації з борту КА;
- визначення координат, лінійних розмірів, площин об'єктів спостереження та розробка і оформлення звітних документів – по кожному об'єкту розвідки;
- тривале (до 30 років) зберігання зареєстрованої інформації та результатів її обробки на оптичних дисках;

комплекс повинен зберігати здатність до безперервного цілодобового функціонування у випадку виходу з ладу його окремих елементів і систем.

До елементів ЦОПІ пред'являються ряд вимог.

Технічні засоби валової та тематичної обробки повинні забезпечувати:

виконання підготовчих операцій валової обробки (визначення правил автоматичної класифікації об'єктів та вибір опорних точок місцевості та потрібної картографічної проекції);

подання зображень на моніторах високого розділення при ширині кадру до 2048 елементів;

керований перегляд знімків без пропусків ділянок;

псевдокольорове подання багатозональних та спектрзональних зображень;

розпізнавання та класифікацію об'єктів;

кількісні розрахунки на об'єктах – координат, відстаней, кутів, периметрів, площин тощо.

Для спеціальної обробки зображень система валової та тематичної обробки повинна виконувати такі операції:

точну прив'язку знімків до опорних точок на місцевості та підвищення точності розташування елементів кадру до 0,1...0,2 кроку елементу;

зменшення похибок у яскравості елементів зображення, що виникають через низьку прозорість атмосфери (серпанок);

зменшення на знімках розмитості, викликаної рухом КА;

доповнення знімків контрольною напівтоною шкалою;

перетворення зображень з метою підвищення ефективності їх візуального сприйняття (підкреслювання дрібних деталей, вирівнювання гістограм напівтонів, цільова фільтрація тощо);

автоматичне розпізнавання й класифікація зафіксованих на зображенні об'єктів різноманітного характеру.

На кожному етапі обробки зображень кожен кадр повинен супроводжуватися все більш повним електронним "паспортом", який, крім даних про умови його реєстрації, сформованих на борту КА (координати, час реєстрації, висота орбіти, кути та

напрямок нахилу оптичної осі сканера, спектральний діапазон, зв'язок з другим кадром, що створює стереопару тощо) повинен містити дані про операції, що проводилися з ним.

Система картографічного забезпечення повинна забезпечувати: автоматизований ввід та формування цифрових карт; приведення координат об'єктів до єдиної системи координат та узагальнення інформації, включаючи зшивання окремих знімків у “мозаїку”;

розрахунок коефіцієнтів картографічних рівнянь; обробка трансформованих, з точністю просторової прив'язки зображень у задану картографічну проекцію; обробка та видача результатів для формування графічних і цифрових тематичних мап, картографічних проекцій.

Система реєстрації, тиражування та видачі інформації повинна забезпечувати реєстрацію й відображення результатів обробки у вигляді текстово-графічних формалізованих документів, фрагментів чорно-білих та синтезованих у кольорі фотокарт, фотопланів та фотознімків, графічних карт та видачу інформації споживачам.

У частині реєстрації система повинна забезпечувати реєстрацію на оптичних носіях вхідної інформації та вихідних звітно-інформаційних документів, їх швидкий пошук та копіювання в разі потреби. Вона повинна забезпечувати підготовку інформаційної бази апріорної та тематичної обробки даних, контроль розподілу даних, захист від несанкціонованого доступу. Система повинна містити блоки оптичних дисків, що забезпечують тривале і компактне зберігання деяких категорій результуючих зображень (від 1,5 до 10 років). Повинен бути забезпечений достатньо швидкий пошук та вилучення з пам'яті зображень при повторному звертанні.

Робоча станція управління системою повинна приймати замовлення від споживачів, у тому числі в автоматичному режимі по телефонній лінії зв'язку через модем ЕОМ, автоматично перевіряти можливість виконання замовлення в

заданий термін, повідомляти замовнику про прийняття замовлення до виконання та припустимі строки виконання.

Загальне поточне планування повинно враховувати погодні умови в потрібному районі, орбітальне та технічне становище засобів системи в цілому.

На основі результатів поточного планування РСУС повинна формувати чергові завдання датчикам БСК КА та передавати їх у НАКУ для подальшої передачі за командною радіолінією на КА.

Управління елементами ЦОРІ та ППІ відповідно здійснюється службою управління по локальних обчислювальних мережах. Для забезпечення управління ППІ службою управління диспетчера ЦОРІ ЛОМ ЦОРІ та ЛОМ ППІ з'єднуються за допомогою моста локальних мереж, що забезпечує РСУ ППІ віддалений доступ до ЛОМ ЦОРІ на правах абонента.

5.2. Основні принципи побудови та функціонування пункту прийому і попередньої обробки

Пункт прийому і попередньої обробки інформації видової космічної розвідки (ППІ) як складова частина наземного спеціального комплексу вирішує завдання прийому спеціальної інформації з КА видової розвідки, її первинної обробки, архівування і передачі отриманої інформації після попередньої обробки в ЦОРІ. Також він виконує завдання взаємодії з НАКУ в межах організації сеансів зв'язку з КА: отримання програми наведення антени або початкових умов для її розрахунку.

5.2.1. Структура та задачі пункту прийому та попередньої обробки інформації

ППІ в своєму складі відповідно до призначення має п'ять основних частин (рис 5.2):

наземну приймально - реєструючу станцію (НПРС);

систему нормалізації та конвертування (СНК) отриманої інформації з програмним забезпеченням обробки даних;
інформаційно - пошукову систему з архівом;
робочу станцію управління ППІ (РСУ ППІ);
систему зв'язку та передачі даних(СЗПД).

Всі складові частини ППІ об'єднані інформаційно в локальну обчислювальну мережу (ЛОМ). Для забезпечення контролю функціонування ППІ до його складу може бути включений контрольний - еталонний комплекс (КЕК).

НПРС має в своєму складі:

антенну систему (АС);

опорно - поворотний пристрій АС (ОПП);

автоматизовану систему управління АС (АСУ АС) з програмним забезпеченням управління АС;

приймально-демодулюючу систему (ПДС) з монітором оперативного перегляду (МОП) зображень, що приймаються;

систему поточної реєстрації (СПР) інформації, що приймається в сеансі.

Засоби ППІ повинні автоматично входити до зв'язку з КА під час чергового сеансу зв'язку, приймати та записувати до вхідної пам'яті інформацію, що передається з борту і службову інформацію, яка відноситься до неї, підраховувати контрольні суми інформаційних блоків, порівнювати їх з відповідними контрольними сумами, що підраховані на борту КА. У випадку невідповідності цих двох контрольних сум ППІ передає через НКУ запит на повторну передачу сеансу. Коли контрольні суми збігались, через засоби НАКУ на борт КА повинен передаватися сигнал - "квитанція" про нормальний прийом сеансу, після чого інформація сеансу звільниться з бортової пам'яті.

Антенна система повинна забезпечувати надійний, без втрат, прийом інформації з борту КА. Коефіцієнт підсилення приймальної антени повинен бути не менше заданого в діапазоні (8,2...8.4 ГГц).

ОПП АС повинен забезпечувати поворот АС у всій верхній напівсфері: діапазон кутів місця від +5 до +175 , діапазон азимутів від 0 до 360 .

АСУ АС повинна забезпечувати програмне наведення антени за цілевказівками. З технологічною метою повинне забезпечуватися ручне управління АС.

Ширина смуги пропускання приймально-демодулюючого тракту повинна приймати змінні значення від 36 до 280 МГц залежно від швидкості передачі інформації. На виході приймально-демодулюючої частини апаратури повинне забезпечуватися відношення сигнал/шум не менше 11,5дБ (для утримання рівня ймовірності помилок не більшого за 10^{-6}).

Приймально-демодулююча апаратура повинна забезпечити:

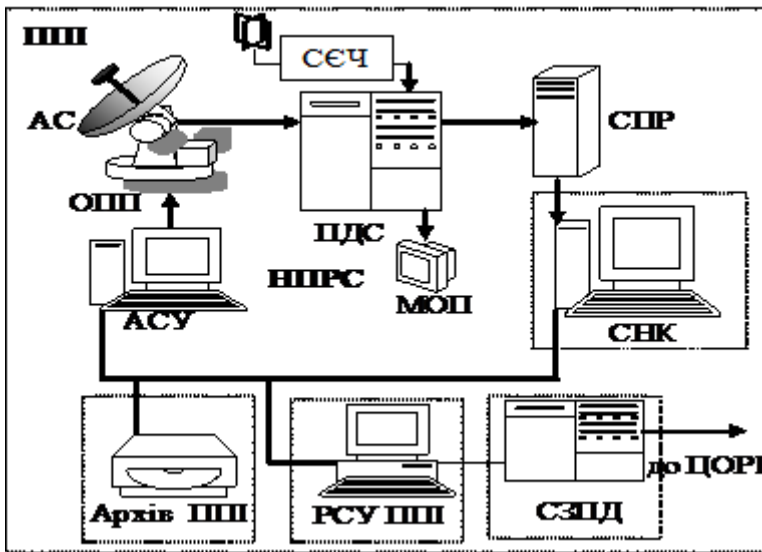


Рис.5.2. Структурна схема ППІ

перетворення сигналів на другу проміжну частоту (280МГц) з урахуванням можливого доплерівського зсуву несучої частоти;
 основне підсилення сигналів на проміжній частоті до рівня роботи ВФМ-демодулятора;
 перетворення прийнятих радіосигналів у відеосигнали (демодуляцію) з урахуванням можливого доплерівського зсуву несучої частоти;

декодування інформації з метою зняття протиперешкодного та засекречуючого кодування (якщо останні застосовані);
відтворення збоїв на принципах інформації протиперешкодного кодування.

Апаратура декомутації (в складі ПДС) повинна здійснювати такі операції з потоком вхідної інформації:

вибір смуги перегляду на МОП;

селекція та вибір каналів датчиків зображень;

суміщення інформації різних датчиків зображень.

Останні дві функції можуть бути покладені на ЕОМ СНК, яка в такому випадку вже програмно поділяє загальний бітовий потік на потрібні канали після реєстрації сеансу.

Для прив'язки інформації до часу з оцифруванням значень годин, хвилин та секунд у приймальній апаратурі повинні формуватися сигнали точного наземного часу з можливістю вводу первинної установки шкали часу. Формування сигналів наземного часу повинно здійснюватися від сигналів системи єдиного часу (СЄЧ).

Технічні засоби реєстрації інформації в ППП повинні забезпечувати:

проміжну реєстрацію даних з борту КА на реєстраторах з високою швидкістю запису (RAID- масиви «вінчестерських» накопичувачів);

ввід бітових потоків у робочі станції нормалізації - конвертування для підготовчих операцій з даними та їх нормалізації;

обсяг пам'яті засобів реєстрації інформації повинен бути не менше максимального обсягу даних, які можуть бути передані за сеанс.

Апаратура СНК сумісно з програмним забезпеченням повинна забезпечувати:

формування заголовків вхідної інформації;

перезапис інформації з виходу апаратури ПДС на накопичувач на магнітному диску (НМД) СНК;

перезапис інформації з НМД на стандартні носії: накопичувач ZIP-Omega або на оптичний диск (CD);

попередню обробку інформації в тому числі - усунення імпульсних перешкод та збійних рядків, розрахунок гістограм яскравості;

автоматичне формування кадрів заданого формату, враховуючи характеристики апаратури конкретного датчика зображень; усунення геометричних та радіометричних викривлень; попередню прив'язку кадрів зображень до карт.

На виході системи нормалізації відхилення фактичного положення кожного елемента кадру від його теоретичного положення не повинно перевищувати 0,5 кроку елемента. Радіометричні викривлення повинні корегуватися до остаточної похибки не більше 0,5% від максимальної яскравості зображення.

Робоча станція управління ППІ повинна містити технічні й програмні засоби, що забезпечують виконання таких функцій: автоматичну реалізацію загальних та поточних планів роботи комплексу по завданням служби управління ЦОРІ; притягнення обслуговуючого персоналу в випадку протиріч; автоматичну передачу нормалізованих зображень ЦОРІ через СЗПД.

5.2.2. Функціонування ППІ

Радіосигнал надходить на приймальну універсальну антенну установку. Вона являє собою двоосьову поворотну систему з параболічним рефлектором діаметром 5м і приводами наведення (ПН). ПН забезпечують поворот однодзеркальної системи по двох осях: куту місця від 0 до +95 і по азимуту +270 відносно середини сектора. Забезпечувана швидкість наведення антени за азимутом - до 13 за секунду, за кутом місця - до 3,5° за секунду. Конструкція ОПП являє собою металеву ферму з противагами, котра забезпечує поворот антени у верхній напівсфері за винятком 10° «воронки». У приводі ОПП використовуються потужні електродвигуни з синхронними датчиками кутів і кутових швидкостей повороту. ОПП оснащена механічними обмежувачами

кута місця і електронно-механічними кінцевими датчиками. Управління ОПП виконується АСУ АС на підставі цілевказівок програми руху і інформації датчиків ОПП.

Антенно-фідерний пристрій прийомного тракту складається з опромінювача і високочастотного тракту. Як опромінювач використовується спіральний випромінювач зворотної хвилі, встановлений у фокальній точці антени. Він виконаний у вигляді двозахідної логоспіральної конічної антени. Застосування даного опромінювача дозволяє одержати високі ТТХ прийомного тракту без застосування багатодзеркальних антенних систем і дає найменше затінення розкриву антени.

Опромінювачі приймають електромагнітні коливання з круговою поляризацією. У одній конструкції з випромінювачами змонтовані перші каскади діапазонних приймачів: фільтри-преселектори діапазонів, малошумлячі параметричні ширококугові підсилювачі, малошумлячі параметричні перетворювачі з несучої середньої частоти діапазону на проміжну, генератори накачки параметричних каскадів і попередні підсилювачі проміжної частоти. Ці елементи приймачів виконані інтегрально.

Сигнал з опромінювача надходить на малошумлячий підсилювач (МШП). Малий рівень сигналу вимагає застосування МШП з дуже низькою шумовою температурою ($T_{ш}$). Вона забезпечується від 80 до 100 К. МШП дає дуже широку смугу посилюваних частот. Тому щоб виключити проходження у прийомний тракт власних шумів, в МШП застосований діапазонний смуговий коаксіальний фільтр (СФ) зі смугою пропускання до 280 МГц. Конструктивно МШП і СФ для забезпечення мінімальних втрат на шляху антена-приймач розміщується на АС у безпосередній близькості від опромінювача.

МШП конструктивно поєднується з конвертором, який перетворює прийняті та підсилені сигнали з несучої частоти діапазону (8,2...8,4ГГц) в сигнали проміжної частоти (700МГц). Конвертор має опорний гетеродин, що має змогу переключення частоти. Це забезпечує вільний вибір визначеної ділянки діапазону несучої частоти. Перетворення частоти до нижчої зменшує втрати на передачу прийнятого сигналу на подальшу обробку.

По коаксіальному кабелю сигнал на проміжній частоті поступає в приймально-демодулюючу апаратуру.

Подальша побудова прийомного тракту структурно представляє із себе звичайну схему приймача з одним перетворенням частоти. Він складається зі змішувача, гетеродина, смугового фільтра основної селекції, тракту проміжної частоти, фазового детектора і вихідних пристроїв.

Гетеродин другого перетворювача частоти керується за допомогою системи автоматичної настройки частоти гетеродина для усунення впливу доплерівського зміщення несучої частоти сигналу передавача КА і нестабільностей частоти генератора накачки параметричних каскадів приймача.

Для забезпечення нормального режиму роботи демодулятора і перетворювачів частоти підсилювальні каскади приймачів охоплені системою автоматичного регулювання підсилення (АРП), що стабілізує рівень сигналу перетворювачів та демодуляторів.

Демодулятор перетворює радіосигнал на другій проміжній частоті з інформацією, що закодована у ньому, за методом відносної фазової модуляції у послідовність відеоімпульсів.

З виходу демодулятора інформація у вигляді послідовності відеоімпульсів (первинний бітовий потік) поступає на апаратуру декодування.

Інформація поступає порціями - інформаційними кадрами (ІК). Кожен ІК містить службові слова (16-64 біти) і інформаційні слова, що несуть зображення та їх паспорти. Задача апаратури декодування - на підставі контрольних сум, що містяться у службових словах, виявити збої у прийнятій інформації та по можливості їх усунути на основі надмірного перешкодостійкого кодування інформаційного кадру (при наявності кодування). У випадку неможливості відтворення інформації апаратура декодування видає сигнал РСУ ППІ для запиту на повторну передачу ІК з борту КА.

У випадку нормального відтворення ІК підлягає декодуванню для зняття засекречуючого кодування (при наявності). Після розсекречування інформаційний кадр перетворюється у апаратурі декомутації, де проходить розділення службових та інформацій-

них слів. Інформаційні слова розділяються на слова - описання інформації (паспорти) та слова, що несуть зображення від різноманітних каналів датчиків. Один з каналів може бути відокремлений для показу поточних зображень цього каналу на МОП.

Розподіл загального бітового потоку на окремі канали по датчиках для наступної обробки здійснюється після сеансу на засобах СНК.

Вся інформація з виходу ПДС поступає під час сеансу зв'язку на СПР, основу якої складає високошвидкісна апаратура магнітного запису: «винчестерські» накопичувачі з високою швидкістю запису, об'єднані в RAID-масив.

На вхід СПР під час сеансу зв'язку поступає весь потік повідомлень з виходу радіолінії. Крім того, туди ж подаються сигнали СЄЧ, сигнали апаратури управління і команди управління засобами ППІ.

Інші елементи ППІ (РСУППІ, АСУАС, Архів, СНК) являють собою спеціалізовані робочі станції, створені на основі швидкодіючих ПЕОМ з відповідним периферійним обладнанням і програмним забезпеченням, дооснащені спеціальною апаратурою у відповідності з призначенням.

АСУ АС має апаратуру збору інформації від датчиків ОПП і видачі команд на привід ОПП.

СНК має спеціалізовані процесори для обробки зображень і апаратуру спряження з СЗПД і ПДС. Як основна апаратура в СНК можуть бути використані спеціалізовані робочі графічні станції. Усі робочі станції зі складу (СНК, РСУППІ, АСУАС, архів) об'єднані високошвидкісною локальною обчислювальною мережею ППІ. Для цього кожна робоча станція має в своєму складі модем, що підключений до кабельної лінії зв'язку.

5.2.3. Принципи побудови системи нормалізації та конвертування даних

Знімки, що отримані з борту КА та зареєстровані у цифровому вигляді апаратурою СПР, істотно відрізняються від ідеального знімка.

Реальні знімки мають геометричні та радіометричні викривлення.

Система нормалізації і конвертування у складі ППІ призначена для проведення кадрів та корегування реальних знімків з метою приближення їх до еталонних.

Зареєстрована СПР інформація, що несе зображення, які отримані датчиками БСК, поступає в СНК для попередньої обробки, де виконуються підготовчі операції з даними:

- уточнення параметрів датчиків зображень;
- розділення бітового потоку інформації на окремі потоки по датчиках і каналах та формування зображень смуг огляду;
- розрізання смуг огляду на окремі кадри та вибракування непридатних для подальшої обробки;
- запис кадрів в стандартних форматах подання;
- уточнення параметрів орієнтування знімків та характеристик кривих датчиків за даними БЗК і БСК КА.

У СНК виконуються такі функції нормалізації:

- радіометричне корегування даних;
- геометричне корегування отриманих зображень та попереднє приведення їх до нормальної проекції за даними орієнтування;
- радіометричне корегування даних з урахуванням викривляючого впливу атмосфери;
- формування паспорта знімка у вигляді текстового файлу;
- реєстрування нормалізованих даних на носіях з високою щільністю запису (CD ROM).

Систематичні геометричні та радіометричні викривлення знімків корегуються за калібрувальними даними, що отримані при наземних випробуваннях знімальної апаратури або за даними, що виміряні у процесі знімання на борту КА.

Нерегулярні радіометричні викривлення частково виправляються на основі статистичних оцінок однорідності сигналів у сусідніх рядках сканування. Нерегулярні геометричні викрив-

лення (у тому числі, які викликані рухами КА в процесі зйомок) оцінюються і виправляються з використанням траскторних вимірів положення, орієнтації та швидкості польоту КА під час знімання і по так званих, опорних точках місцевості (ОТМ). Як ОТМ вибираються природні та штучні об'єкти земної поверхні, які легко виявляються на знімках та картах місцевості та для яких точно відомі геодезичні координати: перехрестя доріг, дамби, аеродроми, окремо стоячі будівлі тощо.

Внаслідок нормалізації одиничних знімків створюються повністю чи частково виправлені (нормалізовані) знімки, які приведені до геодезичних координат земної поверхні (але без урахування викривлень за рельєф).

Внаслідок корекції стереопар отримуються горизонтальні стереопари, приведені до геодезичних координат, що дозволяє сумістити відтворену по стереопарі цифрову модель рельєфу місцевості з відповідною ланкою земної поверхні.

Знімки супроводжуються текстовими супроводженнями (паспортами) про платформу - носій, знімальну апаратуру, час та умови знімання (орієнтування знімків) тощо.

При повному корегуванні виправляються геометричні та радіометричні викривлення, при частковій - тільки радіометричні викривлення та готуються дані, які необхідні для наступного геометричного корегування. Як правило, ці дані мають вигляд так званої матриці геометричного корегування.

Матриця геометричного корегування переводить вузли деякої просторової інтерполяційної сітки, яка лежить у площині початкового зображення, в ті положення, які вони повинні зайняти в площині ідеального знімка або карти.

Як правило, реалізують декілька рівнів нормалізації: від найпростішого радіометричного корегування (усунення радіометричних викривлень, що спричинені характеристичною кривою датчика зображення) до досягнення якості ортознімка. Ортознімок – це таке зображення земної поверхні та розташованих на ній об'єктів, коли геометричне положення кожної точки знімка має прямо пропорційну залежність з географічними (або прямокутними) координатами земної поверхні.

5.2.4. Зміст операцій нормалізації даних

Корегування радіометричних викривлень

У цій задачі найскладнішим є виправлення "смугастості" сканерного знімка, яка викликана різною чутливістю датчиків у приймачі зображення і можливим пропаданням сигналів для окремих рядків сканування. Такі викривлення корегуються за калібрувальними даними, статистичними характеристиками сигналів у сусідніх рядках сканування.

Як правило, корегування виконується у такій послідовності.

1. За даними калібрування будуються характеристичні криві усіх датчиків (калібрування визначає зміщення "рівня чорного" і передаточний коефіцієнт α кожного датчика).
2. Для кожного датчика будується гістограма числових значень сигналів знімка (рис. 5.3). У зв'язку з тим, що число елементів зображення достатньо велике, то гістограму $h(F)$ можна вважати хорошим наближенням до закону розподілу щільності ймовірності яскравості елементів зображення $p(F)$.

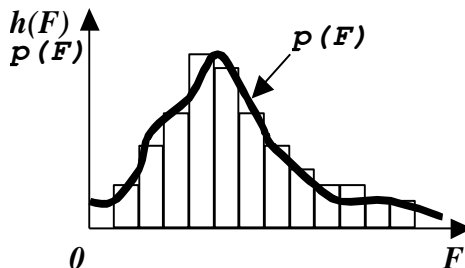


Рис.5.3. Гістограма зображення $h(F)$ та відповідна щільність ймовірності $p(F)$

Гістограма $h(F)$ несе в собі не тільки інформацію про статистичні характеристики початкового зображення $I(x,y)$, але й

викривлення, що викликане функціональним перетворенням передаточної характеристики датчика $F(I)$.

3. За передаточними характеристиками датчиків $F(I)$ визначається діапазон величин реестрованої яскравості (променевої енергії) I , що сприймається без викривлень ΔI .

Цей діапазон використовується для усічення гістограм зображень з метою усунення впливу насиченості та дрейфу нуля датчиків. У результаті такого усічення вилучаються із зображення елементи з крайніми значеннями яскравості, які відповідають нелінійним ланкам характеристичної кривої (рис. 5.4). Значення, які залишилися у зображенні, відповідають лінійній ділянці передаточної характеристики.

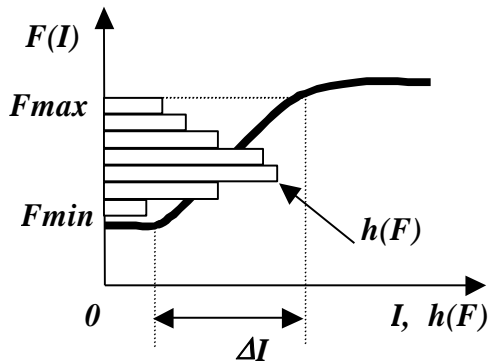


Рис. 5.4. Характеристична крива датчика $F(I)$ та гістограма зображення $h(F)$

Наступним кроком зміни гістограм необхідно усунути вплив різниці передаточних коефіцієнтів $\alpha[n]$ різних елементів фотоприймачів в лінійці. Візуально ця різниця проявляється як “смугастість” сканерного зображення.

4. Находяться параметри гістограм окремих стовпців зображення $h_n(F)$ - середнє значення F_{cpn} та середнє відхилення $\sigma_F[n]$.

5. Середнє значення та середнє відхилення всіх стовпців приймаються за еталон калібрування.

6. Дані кожного датчика підстроюються до еталону таким чином, щоб мінімізувати розходження гістограм $h_n(F)$. Під даними

датчика тут розуміються параметри корекції передаточної характеристики: зміщення початкової точки характеристики $F_{min}[n]$ та відхилення нахилу характеристики $\Delta\alpha[n]$.

7. Підстроєні дані калібрування використовуються для формування таблиць радіометричного корегування сигналів кожного датчика. У таблиці кожному числовому значенню вихідного сигналу n -го фотоприймача лінійки $F[n]$ відповідає виправлене значення цього сигналу $F'[n]$.

Отримання такої таблиці - досить складна задача, яка вирішується методами оптимізації. Щоб не порушити безперервність сигналів по всьому знімку, табличне корегування виконується для деякої поточної смуги, яка складається з кількох рядків сканування. Дані калібрування згладжуються між сусідніми смугами.

Крім операцій корегування знімків при нормалізації часто вводяться додаткові прості радіометричні перетворення, спрямовані на покращання зорового сприйняття знімка - підсилення контрасту та підкреслення контурів. Ці операції проводяться таблично і можуть бути суміщені з операцією корегування.

Корегування геометричних викривлень

Корегування геометричних викривлень, пов'язаних з особливостями сканера і оптичної системи, проводиться шляхом зсуву точок початкового зображення на визначені відстані, які отримуються для кожної точки зображення при наземному калібруванні сканера до запуску КА.

Викривлення, викликані рухом КА, його орієнтацією, обертанням Землі, перспективою тощо, врахувати аналітичним шляхом практично неможливо. У основі корегування цих викривлень лежать методи, засновані на перетвореннях за інформацією про розташування опорних точок місцевості на початковому знімку і еталонному знімку (ортознімку) або цифровій карті місцевості (ЦКМ).

Корегування знімка по сукупності ОТМ виконується у такому порядку.

1. Визначається положення ОТМ на початковому цифровому знімку в цілочисленних координатах елементів растру.

2. За отриманими координатами ОТМ на знімку і відомими координатами ОТМ на ЦКМ будується двовимірна функція геометричного корегування $(X'(x,y); Y'(x,y))^T$ така, щоб при її дії на координати ОТМ еталона (x,y) останні перетворювалися до координат однойменних ОТМ отриманого знімка (X',Y') (рис. 5.5).
3. У координатах еталонного зображення (карти) (x,y) формується пустий масив відліків яскравості $FI(x,y)$, в якому буде формуватися виправлене зображення.
4. Перебираючи всі елементи масиву $FI(x,y)$, визначають значення яскравості кожного шляхом зчитування цього значення з масиву елементів початкового зображення $F(X(x,y); Y(x,y))$ (рис. 5.6).

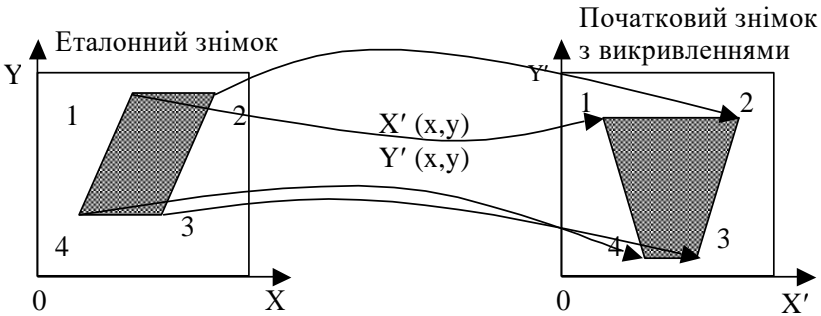


Рис. 5.5. Отримання функції геометричного корегування знімка $(X'(x,y); Y'(x,y))^T$ по ОТМ

Координати точок початкового знімка X',Y' , що відповідні цілочисловим координатам виправленого знімка X,Y , знаходяться шляхом корегуючого перетворення, яке визначене за допомогою ОТМ.

ОТМ шукаються на знімках візуально тільки при початковій побудові бібліотеки ОТМ. Для їх пошуку використовуються радіометрично виправлені знімки, топографічні карти в потрібних проекціях та інші дані про географічні координати і висоти ОТМ.

Фрагменти знімків виводяться по одному на екран робочої станції нормалізації - конвертування.

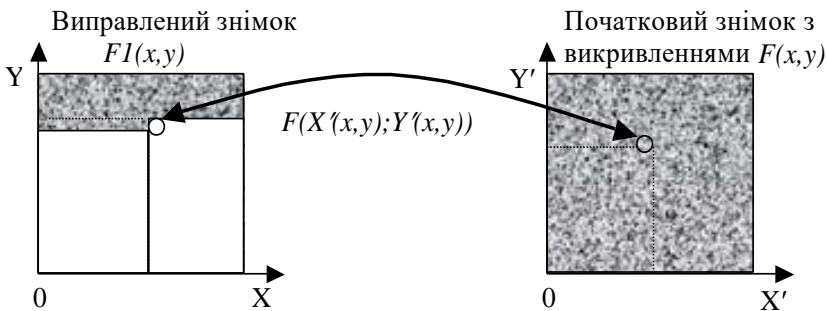


Рис. 5.6. Заповнення масиву корегованого зображення

Оператор, використовуючи карту місцевості, помічає на знімку і на карті точне положення кожної ОТМ. Після цього автоматично будується двовимірна функція геометричного корегування і оцінюється похибка отриманого відображення знімка у площину карти.

Якщо похибка велика, оператор вибирає допоміжні ОТМ (ДОТМ) у межах знімка, щоб довести точність перетворення до заданої.

Географічні координати ДОТМ рекурентно уточнюються на основі повторних розрахунків функції корегування з урахуванням оцінок похибок.

Фрагменти знімка зі знайденими ОТМ і їх географічні координати заносяться в бібліотеку ОТМ й використовуються при автоматичному корегуванні наступних знімків того ж району земної поверхні.

Оскільки діалогове корегування знімків та створення бібліотеки ОТМ відносяться до найтриваліших операцій, технологія масового корегування знімків передбачає режим автоматичного визначення ОТМ за даними, що накопичилися у бібліотеці ОТМ.

Для автоматичного визначення положення ОТМ, як правило, використовують критерій максимуму взаємної кореляції між си-

гналами еталонного фрагменту з бібліотеки і ланкою знімка, в якій шукається ОТМ, або критерій мінімуму сумарної абсолютної різності значень сигналів на цих зображеннях. Для прискорення першого методу використовується швидкий алгоритм перетворення Фур'є (ШПФ), а для прискорення другого - алгоритм послідовного виявлення подібності сигналів.

5.3. Основні принципи побудови та функціонування широкосмугової радіолінії зв'язку "борт - Земля"

Для забезпечення передачі великого обсягу розвідінформації, що отримується датчиками БСК з КА на Землю (в НСК) за малий час сеансу зв'язку (5-15хв) необхідна організація широкосмугової радіолінії зв'язку (ШРЗ), що забезпечує надійне отримання інформації апаратурою ППІ.

Виходячи з функціонального призначення, спеціальний комплекс космічної розвідки може містити в своєму складі три радіолінії передачі розвідувальної інформації з борту КА:

радіолінію "КА - ППІ" для безпосередньої передачі інформації на ППІ;

радіолінію "КА - супутник-ретранслятор (СР)" для передачі інформації на СР;

радіолінію "СР - ППІ" для передачі інформації з СР на ППІ.

Для забезпечення надійного приймання розвідінформації з борту розвідувального КА повинна забезпечуватися ймовірність збою на один символ інформації не більше 10^{-6} в радіолінії "КА - ППІ".

Ці вимоги повинні забезпечуватися при роботі КА на орбітах з кутами нахилу 80° - 97° і висотами 400...800 км. Як СР може використовуватися один із стволів супутника-ретранслятора системи супутникового зв'язку (наприклад, "Либідь"), що знаходиться на геостаціонарній орбіті на довготі 23° СД.

Бортова апаратура радіоліній може забезпечувати роботу в таких режимах:

ВІ - передача запам'ятованої інформації по радіолінії КА - ППІ з швидкостями 16...256 Мбод;

ВІ-Р - передача запам'ятованої інформації по радіолінії КА - СР - ППІ з швидкостями 16...256 Мбод;

БП- безпосередня передача інформації без запам'ятовування по радіолінії КА-ППІ з швидкостями 16...256 Мбод;

БП - Р - передача інформації без запам'ятовування по радіолінії КА - СР - ППІ з швидкостями 16...256 Мбод.

Передача інформації по радіолінії КА - ППІ може бути здійснена два - три рази на добу, а по радіолінії КА - СР - ППІ до 10 разів на добу.

Сеанс зв'язку продовжується 5...15 хв.

Розглянемо геометричні особливості системи КА - СР - Земля. На рис. 5.7 подано взаємне розташування Землі, орбіти КА, СР і ППІ.

Визначимо час сеансу зв'язку t_c та максимальну дальність зв'язку за сеанс для режиму безпосередньої передачі КА - ППІ.

Сеанс зв'язку можливий на ланці орбіти $L3-L4$, тобто при проходженні радіуса-вектора "центр Землі - КА" ланки кутів ϕ_1, ϕ_2 (рис. 5.8).

Кути ϕ_1, ϕ_2 визначаються з трикутників "О- L_3 -ППІ" і "О- L_4 -ППІ" за формулами:

$$\phi_1 = \arccos \frac{R_{3K}}{R_{3П} + H};$$

$$\phi_2 = \arccos \frac{R_{3K}}{R_{3E} + H},$$

де R_{3K} - радіус Землі на широті Києва; R_{3E} - радіус Землі на екваторі (6378 км); $R_{3П}$ - радіус Землі на полюсі (6367 км); H - висота кругової орбіти.

Максимальна дальність зв'язку при безпосередній передачі визначається так:

$$D_{\max} = D_1 = R_{3K} \sin \phi_1 = R_{3K} \sqrt{1 - \frac{R_{3K}^2}{(R_{3K} + H)^2}}.$$

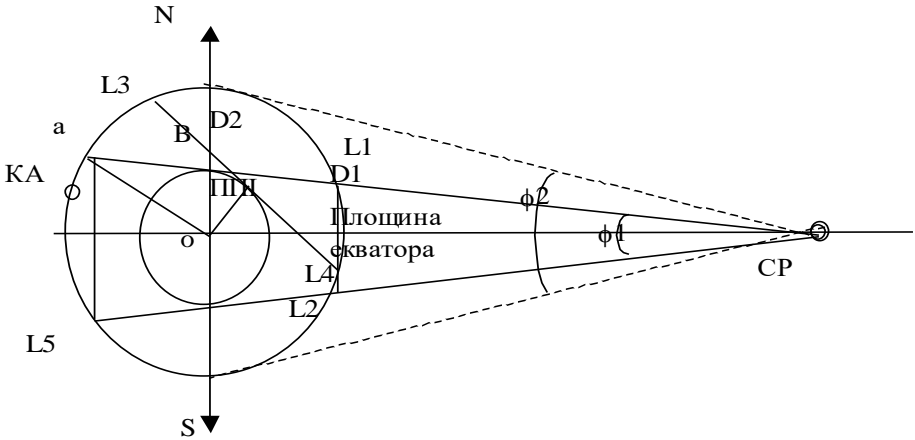


Рис.5.7. Взаємне розташування Землі, орбіти КА, CP і ППП

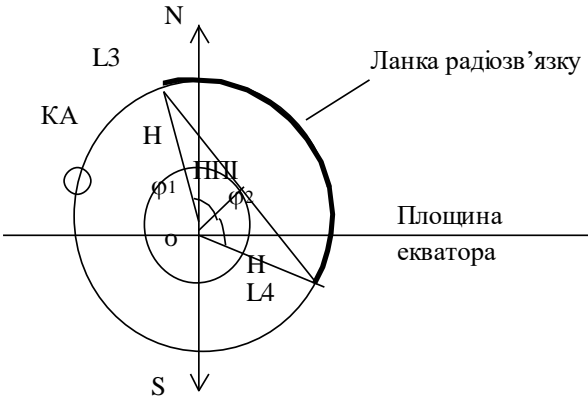


Рис. 5.8. Визначення кутів ϕ_1, ϕ_2

Час сеансу зв'язку для кругової орбіти визначається так:

$$t_{CB}^{EP} = \frac{T_{OB}}{360^\circ} (\phi_1 + \phi_2 - 2\phi_{3AKP}),$$

де T_{OB} - час обертання; $\phi_{закр}$ - мінімальний кут місця приймальної антени ППІ.

Як видно з рис. 5.7, при передачі інформації через СР з шириною діаграми спрямованості антени СР ϕ_1 , яка забезпечує глобальний зв'язок для території України, КА зможе передавати інформацію на СР тільки в межах дуги L_1-L_2 , що втрачає сенс, оскільки при безпосередній передачі дуга L_3-L_4 значно довша. Тут береться до уваги передача через СР системи "Либідь" що розташована практично на довготі ППІ. Для забезпечення зв'язку КА з СР поза зоною видимості КА з ППІ на СР необхідна установка такої приймальної антени з шириною діаграми спрямованості ϕ_2 , в якій рівні -3 дБ від максимуму будуть дотичними до сферичної поверхні, що прокреслюється орбітою КА навколо Землі при її обертанні. У цьому випадку зв'язок КА з СР буде забезпечено в межах дуги $a-L_5$. При цьому максимальна дальність КА - СР буде визначатися так:

$$D_{\max} = D_{1\max} + D_{2\max} = R_{ЗК} \left(\sqrt{1 - \frac{R_{ЗК}^2}{(R_{ЗС} + H)^2}} + \sqrt{1 - \frac{R_{ЗК}^2}{(R_{ЗЕ} + h_{СР})^2}} \right),$$

де $R_{ЗС}$ - радіус Землі на широтах близько 45° (прийнемо $R_{ЗС} = 6367$ км); $h_{СР}$ - висота орбіти СР (геостационарна орбіта), $h_{СР} = 35624$ км (рис. 5.9).

Для кругової орбіти (при $H = 540$ км) D_{\max} становить 44220км. Час сеансу зв'язку через СР можна визначити так:

$$t_{\bar{N}\bar{A}}^{\bar{N}\bar{D}} = \frac{T_{\bar{I}\bar{A}}}{180} (\alpha_1 + \alpha_2) = \frac{T_{\bar{I}\bar{A}}}{180} \left(\arccos \frac{R_{\bar{C}\bar{E}}}{R_{\bar{C}\bar{N}} + H} + \arccos \frac{R_{\bar{C}\bar{E}}}{R_{\bar{C}\bar{A}} + h_{\bar{N}\bar{D}}} \right).$$

При роботі з КА з низькими орбітами необхідно враховувати (компенсувати) доплерівське зміщення несучої частоти передавача КА, яке пропорційне радіальній швидкості КА відносно наземного приймального пункту (рис. 5.9). При безпосередній передачі максимальна радіальна швидкість КА V_r буде при виході КА із-за радіогоризонту. Її величина може бути визначе-

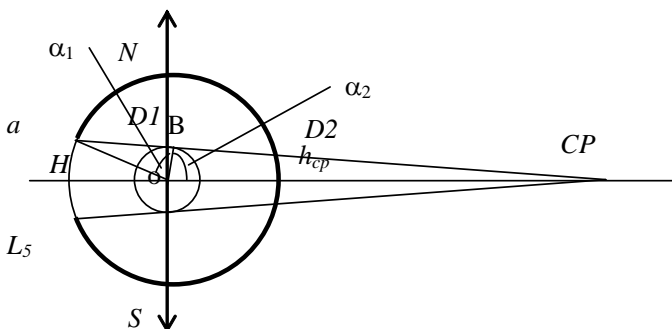


Рис.5.9. До визначення максимальної дальності та сеансу зв'язку

на за формулою

$$V_r = V \cos \phi_1 = V \cos \frac{R_{3K}}{R_{3П} + H}.$$

Тоді величину максимального доплерівського зсуву частоти при БП можна визначити так:

$$f_{Д\max}^{БП} = \frac{V_r f_o^{БП}}{C} = \frac{V f_o^{БП} R_{3K}}{C(R_{3П} + H)},$$

де $C = 299799$ км/с - швидкість розповсюдження радіохвиль; V - лінійна швидкість руху КА по орбіті (7,91 км/с для кругової орбіти); $f_o^{БП}$ - несуча частота передавача КА в режимі безпосередньої передачі (8,2...8,4 ГГц).

При русі КА по круговій орбіті і швидкості передачі інформації 64 Мбод для діапазону несучих частот 8,2 ... 8,4 ГГц доплерівський зсув частоти в режимі безпосередньої передачі становитиме 0,2% ширини спектру.

При роботі КА через СР максимальна радіальна швидкість зближення (віддалення) КА і СР буде в точках торкання діаграми направленості приймальної антени СР орбіти КА. Тобто в цих точках $V_r = V_o$. (рис. 5.10). Тоді величину доплерівського зсуву частоти при роботі через СР можна обчислити так:

$$f_{Д\max}^{СР} = \frac{V f_o^{СР}}{C}.$$

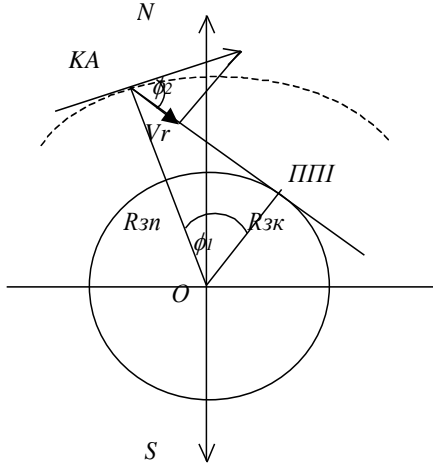


Рис.5.10. До визначення максимальної радіальної швидкості зближення (віддалення) КА і СР

Для забезпечення міжспутникового зв'язку дозволені діапазони (22,55...23,55 ГГц) і (185... 190 ГГц) + 40ГГц?. Беручи за несучу частоту 23 ГГц ($\lambda = 1,3$ см), отримаємо для кругової орбіти ($H=550$ км) $f_{Дmax}^{CP} = 600$ кГц.

При проходженні радіохвиль крізь атмосферу відбувається їх поглинання киснем, парою, гідрометеорами. Сумарні втрати радіолінії КА - ППІ (діапазон 3,6 ГГц) у атмосфері становлять 0,85 дБ. Сумарні втрати радіолінії СР -ППІ (діапазон 11,45 ГГц, $\lambda = 2,26$ см) в атмосфері для системи "Либідь" становлять 2,3 дБ. Втрати енергії радіоліній у вільному просторі апроксимуються за формулою

$$\Delta P[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{d}{\lambda} + 11,$$

де d - дальність радіозв'язку; λ - довжина хвилі.

Втрати енергії у вільному просторі для радіолінії КА - ППІ становлять 85 дБ (для висоти орбіти 600 км), для радіолінії КА- СР - 106 дБ.

Для визначення втрат у вільному просторі для радіолінії СР - ППІ (діапазон 11, 45 ГГц, $\lambda = 2,62$ см) необхідно визначити похибку дальність радіозв'язку

$$D_{CP} = \rho^2 + R_{3K}^2 - 2\rho^2 R_{3K}^2 \cos \varphi_K \cos \sqrt{\lambda_K - \lambda_{CP}},$$

де ρ - радіус-вектор на СР; $\lambda_{K\Box}, \varphi_K$ - широта та довгота ППІ.

Для ППІ, що знаходиться у Києві втрати радіолінії СР - ППІ становитимуть 102,8 дБ. Приймаючи потужність передавача КА $P_{KA} = 10$ Вт, коефіцієнт підсилення антени передавача КА $G_{KA} = 1$, коефіцієнт використання потужності передавача $\alpha = 0,9$, отримуємо для КА еквівалентну потужність, що випромінюється: $P_{EKA} = P_{KA} G_{KA} \alpha = 0,9$ Вт. Для СР "Либідь" потужність передавача $P_{KA} = 20$ Вт, $\alpha = 0,9$, втрати у фідерному тракту порядку 1 дБ.

Для забезпечення ймовірності збою не більше 10^{-6} відношення потужності сигналів, що приймаються, до потужності шумів на вході приймача повинно бути не менше 11,5 дБ з урахуванням застосування коригуючого кодування, а для забезпечення ймовірності збою 10^{-5} це відношення повинно бути не менше 10,5 дБ.

Ширина смуги пропускання одного ствола СР "Либідь" становить 36 МГц. Отже, передача інформації по каналу КА - СР - ППІ можлива тільки на швидкостях 16 Мбод і менше.

При швидкості передачі інформації 16 Мбод рівні сигналів на виходах приймальних антен складають такі величини:

для радіолінії КА - ППІ $P_C = -119$ дБ;

для радіолінії КА - СР $P_C = -117$ дБ;

для радіолінії СР - ППІ $P_C = -119$ дБ.

При швидкостях передачі інформації 32 і 64 Мбод потужності сигналів повинні бути відповідно збільшені на 3 і 6 дБ

$$P_C = 10 \lg(k T_{ш} 2I) + 11,5 [\text{дБ}],$$

де k - стала Больцмана; $T_{ш} = 183$ К - шумова температура приймальної антени з урахуванням зовнішніх шумів; I - швидкість передачі інформації (бод).

Проведемо підрахунок енергетичного балансу радіоліній за формулою

$$P_{\text{ПРД}} + G_{\text{ПРМ}} + P_C + G_{\text{ПРД}} - \alpha - \Delta P_{\text{Ф}} - \Delta P_{\text{ВП}} - \Delta P_{\text{ТР}} = 0,$$

де $P_{\text{ПРД}}$ - потужність передавача (дБ); P_C - потрібна потужність сигналу на виході антени приймача (дБ); $\Delta P_{\text{Ф}}$, $\Delta P_{\text{ВП}}$, $\Delta P_{\text{ТР}}$ - втрати відповідно у фідерному тракті передавача, у вільному просторі і тропосфері; $G_{\text{ПРД}}$, $G_{\text{ПРМ}}$ - коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен відповідно.

Виходячи з енергетичного балансу, визначені потрібні коефіцієнти підсилення приймальних антен:

для радіолінії КА - ППІ $G_{\text{ПРМ}} = 45,74$ дБ ;

для радіолінії СР - ППІ $G_{\text{ПРМ}} = 41$ дБ.

Ці коефіцієнти підсилення відповідають діаметрам приймальних антен ППІ 6,8 м (для КА - ППІ) та 1,2 м (для СР - ППІ). Тому потрібно вибрати для ППІ антену діаметром не менше 6,8 м для швидкості передачі 16 Мбод. Для швидкостей передачі 32 і 64 Мбод діаметр приймальної антени повинен бути збільшений до 10 і 14 м відповідно.

З рівняння енергетичного балансу можна визначити еквівалентну ізотропно випромінювану потужність для передавача радіолінії КА - СР:

$$P_{\text{ЕКА}} = P_{\text{ПРД}} + G_{\text{ПРД}} = 28,5 [\text{Вт}].$$

Ця потужність повинна бути розподілена між передавачем (потужність [Вт]) та антеною (коефіцієнт підсилення в разях). Збільшення потужності передавача КА вище 10...20 Вт надто важке через обмеженість енергетичного ресурсу КА.

За коефіцієнтом підсилення $G_{\text{ПРД}}$ малоімовірна можливість виготовлення антени з коефіцієнтом більше 50 дБ (діаметр 1,7 м), що витримує параметри, які вимагаються у космосі, і вимагає, до того ж, системи точного націлювання на СР.

Таким чином, при заданих вимогах побудова радіолінії КА – СР на сучасному етапі ускладнена. Цю проблему можна вирішити, знизивши швидкість передачі інформації на 3 - 4 порядки, що при поставленій меті (передача 23 Гбіт інформації за час сеансу) неприпустимо.

5.4. Принципи побудови системи валової та тематичної обробки зображень

У процесі валової та тематичної обробки виконується:

- оперативне візуальне дешифрування зображень;
- розпізнавання та класифікація об'єктів земної поверхні за їх багатозональним зображенням;
- вимірювання кількісних показників об'єктів;
- визначення характеристик класифікованих об'єктів;
- реєстрація результатів тематичної обробки даних;
- оформлення та друкування звітно-розвідувальних документів.

5.4.1. Склад операцій валової і тематичної обробки

Валова обробка отриманих зображень виконується в інтересах групи споживачів і спрямована на підготовку до тематичної обробки. У процесі валової обробки виконуються операції по покращанню якості зображень і комплексуванню зображень, що отримані різними датчиками (створення кольоровосинтезованих зображень).

Тематична обробка проводиться в інтересах конкретного споживача і направлена на витягнення корисної смислової кількісної і координатної інформації з зображень, що пройшли валову обробку.

Основною операцією тематичної обробки є дешифрування зображень з метою витягнення потрібної споживачу інформації.

Технологічні операції валової і тематичної обробки проводяться на одному й тому ж автоматизованому робочому місці (АРМ) інтерпретатора-дешифрувальника, що виконує цільову функцію в інтересах конкретного споживача.

У процесі валової та тематичної обробки вирішуються такі задачі.

1. Введення і оцифрування зображень з твердих носіїв (негатива, позитива), а також введення з оптичних дисків.
2. Виведення зображень на папір і оптичні диски.

3. Формування та печатання текстових і графічних документів з результатами дешифрування.
 4. Формування і ведення бази даних АРМ, що містить: еталони об'єктів дешифрування та їх опис; характеристики апаратури, що формує зображення; результати дешифрування і звітні документи.
 5. Формування еталонів і модельно-текстових зображень для підтримки візуального і автоматизованого дешифрування.
 6. Введення та відображення цифрових карт місцевості заданого району спостереження і масштабу.
 7. Операції на ЦКМ, прив'язка зображень до ЦКМ.
 8. Відображення результатів дешифрування на зображення і ЦКМ.
 9. Автоматизований пошук на зображенні опорних об'єктів та визначення їх координат.
 10. Автоматизоване суміщення зображень однієї й тієї ж місцевості, що отримані в різних діапазонах спектра і в різний час.
 11. Інформаційно-довідкове забезпечення роботи інтерпретатора-дешифрувальника.
- Введення зображень виконується з оптичних дисків або пристроїв вводу відеоданих (сканер). Вивід зображень проводиться на відеосистему АРМ, на лазерний або струменевий принтери.
- Програмне забезпечення АРМ забезпечує такі операції з зображенням:
1. Автоматичне дешифрування простих об'єктів напівтонових і контурних зображень.
 2. Формування інформаційних ознак об'єктів.
 3. Основні операції трансформації зображень: збільшення детальності та чіткості; підкреслювання контурів; вирівнювання яскравостей; відділення тіней від об'єктів; виділення дрібних та крупних деталей з фоном або без нього; усунення розривів контурних зображень; кольорове кодування; підсилення локальних контрастів;

згладжування зображення;
алгебраїчні операції з зображеннями;
побудова проєкцій на заданий напрямок;
розрахунок статистичних характеристик зображення;
побудова гістограм;
побудова пірамідальної структури зображення;
сегментація зображень по заданій умові або ознаці однорідності;
рангова фільтрація;
фільтрація з заданим фільтром;
придушення залишкових викривлень за заданою просторово-інваріантною функцією точки розсіяння (усунення лінійного змазу, дефокусування, блакитної димки);
формування паспорту зображення.

4. Геометричні перетворення:

зсув, поворот, масштабування;
трансформація в картографічні проєкції;
нанесення координатної сітки;
кадрування та зшивка зображень;
проєктивні перетворення.

5. Спектральні перетворення (Фур'є).

АРМ дозволяє проводити такі операції з технологічним процесом обробки.

1. Формування технологічної схеми;
2. Відображення каталогу програм для включення в технологічну схему.
3. Перевірка сумісності налагоджувальних параметрів програм.
4. Корегування технологічної схеми.
5. Візуалізація технологічної схеми.
6. Налгоджувальне (покрокове) виконання технологічної схеми обробки зображень.

5.4.2. Технологія автоматизованого дешифрування знімків

На рисунку 5.11 показана узагальнена технологічна схема автоматизованого дешифрування зображень.

зображень потрібних об'єктів (ЕО) і ознак досліджуваного фрагмента ланки зображення.

Відповідно до цільової задачі (що шукати) і відібраної групи ознак (за якими ознаками шукати) проводиться вилучення з бази даних еталонних об'єктів (БДЕО) еталонних зображень об'єктів у вигляді наборів ознак цих об'єктів.

Критерії і ознаки еталонних об'єктів служать основою для організації пошуку об'єктів на ланці зображення. Для цього трансформована ланка зображення розбивається на елементарні фрагменти. Для кожного фрагмента проводиться оцінка відібраної групи ознак. Відповідно до критеріїв перевіряється збіг оцінки ознак фрагмента з ознаками еталона. В результаті пошуку визначаються координати знайдених об'єктів на ланці зображення.

Далі, за потребою, проводиться розрахунок параметрів об'єктів (площ, відстаней, кутів тощо). Крім того, оцінюються апостеріорні ймовірності розпізнання еталонних зразків.

Знайдені об'єкти та їх параметри реєструються на цифровій карті місцевості і позначаються на ланці зображення.

Складається текстовий опис ланки зображення.

Останнім етапом є повторна візуальна оцінка ланки зображення з метою візуального виявлення не знайдених в автоматичному режимі об'єктів.

У випадку, якщо нові об'єкти не знайдені, проводиться вибір наступної ланки зображення і процес повторюється.

Якщо ж візуально знайдені об'єкти не знайдені при автоматичному пошуку, то проводиться поповнення БДЕО по наступній технологічній схемі (рис. 5.12).

Фрагмент зображення з об'єктом, знайденим візуально, оцінюється на відповідність якості: оцінюються статистичні характеристики, розраховуються гістограми і оцінюється апріорна ймовірність розпізнавання.

Якщо якість фрагмента погана, то об'єкт з цього фрагменту не заноситься до БДЕО. Якщо якість добра, то зображення об'єкта виділяється з фрагмента в діалоговому режимі і реставрується для підвищення його якості.

Потім об'єкт класифікується за типом та (або) за цільовим призначенням. По реставрованому зображенню проводиться оцінка всіляких ознак для всіх методів, що використовуються. Результати класифікації і оцінки ознак заносяться до БДЕО як новий еталонний об'єкт.

Після занесення нового об'єкта в БДЕО проводиться перевірочний автоматизований пошук цього об'єкта у початковій ланці зображення. При цьому оцінюються апостеріорні ймовірності розпізнавання об'єктів, що враховуються при наступному пошуку таких об'єктів як вагові коефіцієнти групи дешифрувальних ознак.

5.4.3. Технічні засоби системи валової та тематичної обробки

Основу технічних засобів СВТО становить програмно-технічний комплекс (ПТК) обробки інформації видової розвідки. Він являє собою автоматизовані робочі місця (АРМ) інтерпретаторів-дешифрувальників, що об'єднані ЛОМ. Управляє роботою мережі робоча станція-сервер. Всі АРМ мають дисплейний контролер – Matrox з підтримкою роботи двох моніторів.

ПТК призначений для отримання, попередньої обробки, дешифрування видових зображень, топогеодезичної прив'язки об'єктів місцевості та доведення до військ результатів обробки матеріалів дистанційного зондування.

Джерелами надходження видової інформації для ПТК є:

знімки з комерційних КА іноземного походження, які надходять шляхом закупівлі їх через Національне космічне за агентство України рахунок коштів Загальнодержавної національної програми України;

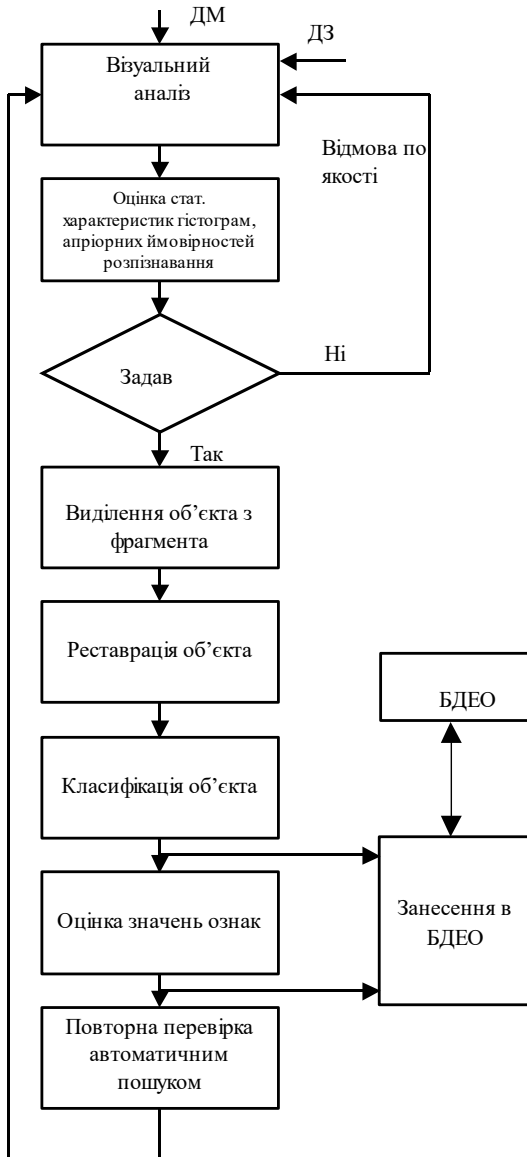


Рис. 5.12. Технологічна схема поповнення БДЕО

архівні матеріали космічної зйомки з ДНВП “Природа”
Національного космічного агентства України;

матеріали верифікаційних польотів, які виконані за догово-
ром “Відкрите небо”;

пакели космічних знімків, які отримуються оперативним
шляхом.

Структура ПТК відображена на рис. 5.13.

Організаційно ПТК містить 5 робочих місць.

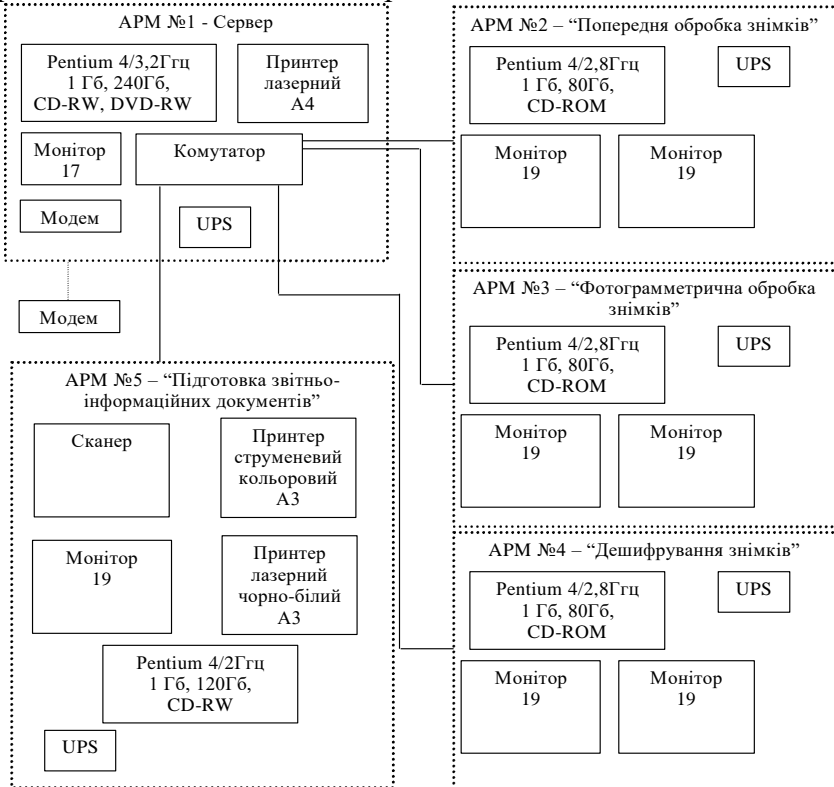


Рис. 5.13. Структурна схема ПТК

За допомогою АРМ №1 виконуються такі задачі:

- керування робочими станціями в локальній мережі;
- отримання цифрової видової інформації з різних джерел;
- керування периферійними пристроями з виводом на друк;

- зберігання службової інформації;
- запис інформації на різні носії з метою подальшої передачі;
- зберігання та опрацювання баз даних.

Робоча станція-сервер побудована на базі ПЕОМ з процесором Pentium IV/ 3,2ГГц, оперативною пам'яттю 1Гбайт, накопичувачами на жорстких магнітних дисках (дисковий простір) 240 Гбайт, накопичувачами на оптичних дисках (CD-RW, DVD-RW). АРМ містить модем, монітор розміром "17" з низьким випромінюванням і цифровим контролем розгортки. Розмір точки 0,25 мм. Кадрова частота - 120 Гц; рядкова частота - 65 кГц та джерело безперервного живлення (UPS) потужністю 1000 Вт. Робоче місце №2 – "Попередня обробка знімків".

АРМ №2 призначене для попередньої обробки аерокосмічних знімків.

Попередня обробка аерокосмічних знімків передбачає:

- перегляд різноманітних типів зображень;
- нашаровування типів даних;
- упорядковування індексів шарів;
- динамічна зміна масштабу зображення;
- встановлювання вікна заданого масштабу;
- безперервне переміщення зображення за допомогою інструмента "долоня";
- здійснювання перерахунків даних файла" на льоту";
- повернення зображення на заданий кут;
- модифікування гістограми зображення;
- геометричне корегування знімків за даними датчиків;
- повне геометричне та радіометричне корегування знімків;
- редагування таблиці псевдокольників для тематичних шарів;
- перекодування значення класів;
- проведення фільтрування та покращення зображень;
- виклик редактора та бібліотеки фільтрів;
- проведення мультиспектрального синтезу, аналізу та класифікації зображень;
- застосовування інтерполяційних методів редагування частин зображення;

- проведення вирізки зображень;
- забезпечення збереження відпрацьованого матеріалу у бібліотеці зображень;
- виведення даних на друкування.

АРМ №2 – двомоніторна робоча станція на базі ПЕОМ з процесором Pentium IV/ 2,8ГГц, оперативною пам'яттю 1Гбайт, накопичувачами на жорстких магнітних дисках (дисковий простір) 80 Гбайт, накопичувачами на оптичних дисках (CD-ROM).

АРМ має два монітори розміром "19" з низьким випромінюванням і цифровим контролем розгортки. Розмір точки 0,25 мм. Кадрова частота - 120 Гц; рядкова частота - 65 кГц та джерело безперервного живлення (UPS) потужністю 700 Вт.

Робоче місце №3 – "Фотограмметрична обробка знімків".

АРМ №3 призначене для геодезичної прив'язки об'єктів місцевості та проведення вимірювань на зображенні.

Основні фотограмметричні операції:

1. Прив'язка знімка виконується кількома методами, які вибирає оператор залежно від початкового матеріалу, а саме:

- за топографічними картами;
- за окремими геодезичними даними з каталогу координат;
- за однойменними контурами місцевості, визначеними на фотознімках та ЦКМ.
- відображення топографічної карти;
- нанесення тематичних об'єктів на топооснову;
- ввід корегування характеристик тематичних об'єктів (атрибутивної інформації) у діалоговому вікні;
- вибір тематичного об'єкта на карті;
- відображення у діалоговому вікні характеристик обраного тематичного об'єкта;
- відображення на карті тематичних об'єктів, задовольняючих потрібні характеристики;
- вибір тематичних шарів карти та пошарове відображення тематичних карт;
- масштабування та зміщення по карті за допомогою інструмента "долоня".

2. Перетворення знімків у задану картографічну проєкцію.
3. Ортотрансформування знімків з використанням цифрових моделей рельєфу.
4. Побудова стереомоделі по стереопарах.
5. Виміри координат, довжин, відстаней, периметрів та площин по знімках.
6. Створення мозаїк з окремих знімків.

АРМ №3 – двомоніторна робоча станція на базі ПЕОМ з процесором Pentium IV/2,8ГГц, оперативною пам'яттю 1Гбайт, накопичувачами на жорстких магнітних дисках (дисковий простір) 80 Гбайт, накопичувачами на оптичних дисках (CD-ROM). АРМ має два монітори розміром "19" з низьким випромінюванням і цифровим контролем розгортки. Розмір точки 0,25 мм. Кадрова частота 50 - 150 Гц; рядкова частота 21 – 68 кГц та джерело безперервного живлення (UPS) потужністю 400 Вт.

Робоче місце №4 – "Дешифрування знімків".

АРМ №4 призначене для дешифрування зображень у інтерактивному режимі, що забезпечується виконанням таких основних операцій:

- завантаження обробленого зображення (знімка) на перший монітор;
- визначення оператором у інтерактивному режимі потрібного району;
- обробка вибраного об'єкта;
- збереження дешифрованого зображення, окремих "вирізаних" об'єктів та таблиць характеристик.

АРМ №4 – двомоніторна робоча станція на базі ПЕОМ з процесором Pentium IV/ 2,8ГГц, оперативною пам'яттю 1Гбайт, накопичувачами на жорстких магнітних дисках (дисковий простір) 80 Гбайт, накопичувачами на оптичних дисках (CD-ROM).

АРМ має два монітори розміром "19" з низьким випромінюванням і цифровим контролем розгортки. Розмір точки 0,25 мм. Кадрова частота 50-150 Гц; рядкова частота 21-68 кГц та джерело безперервного живлення (UPS) потужністю 400 Вт.

Робоче місце №5 - "підготовка звітно-інформаційних документів".

АРМ призначене для оформлення звітно-інформаційних документів. АРМ містить двомоніторну робочу станцію, побудовану на базі ПЕОМ з процесором Pentium IV/2,8ГГц, оперативною пам'яттю 1Гбайт, накопичувачами на жорстких магнітних дисках (дисковий простір) 120 Гбайт, накопичувачами на оптичних дисках (CD-RW, CD-ROM). АРМ містить монітор розміром "19" з низьким випромінюванням і цифровим контролем розгортки. Розмір точки 0,25 мм. Кадрова частота 50 - 150 Гц; рядкова частота 21 - 68 кГц та джерело безперервного живлення (UPS) потужністю 400 Вт.

Крім того, до складу АРМ входить ряд принтерів.

1. Принтер - лазерний, чорно-білий 1200x1200 dpi, формат аркуша А3).

2. Струменевий кольоровий принтер 1200x1200 dpi., формат аркуша А3.

3. Чорно-білий лазерний принтер 600x600 dpi., формат аркуша А4.

Крім того, АРМ оснащується сканером (оптичне розподілення 12800 точок на дюйм, 16,8 млн. колірних відтінків, 256 відтінків сірого, формат А3).

Така побудова СВТО (сервер, мережа, UPS) дозволяє:

надійно зберігати інформацію на накопичувачах сервера;

забезпечити її цілісність (великі об'єми зовнішньої пам'яті сервера і АРМ);

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вартанесян В.А. Радиоэлектронная разведка. – М: Воениздат, 1975. – 255 с.
2. Пясковский Д.В., Парфенюк В.Г. Основы построения систем управления космическими аппаратами: Конспект лекций. – Житомир: ЖВІРЭ, 1998. – Ч.1. – 188 с.
3. Управління космічними системами: Завдання на практичні заняття / Розроб. В.Г. Парфенюк, П.П. Топольницький та ін. – Житомир: ЖВІРЕ, 2000. – 52 с.
4. Богачков Н.И., Кононов В.И. и др. Технические средства воздушной разведки. – К.: КВАИУ, 1974. – 292 с.
5. Буренин Н.И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной.- М.: Сов. радио, 1972. – 174 с.
6. Реутов А.П. и др. Радиолокационные станции бокового обзора. - М.: Сов. радио, 1970. – 213 с.
7. Ахметьянов В.Р., Пасмуров А.Я., Пономаренко А.П. Цифровые методы получения изображений с помощью космических радиолокационных станций с синтезированной апертурой // Зарубежная радиоэлектроника. – 1985. – № 4. – С. 24–34.
8. Ильин А.Л., Пасмуров А.Я. Отображение частично-когерентных поверхностно-распределенных целей в радиолокаторе с синтезированной апертурой // Зарубежная радиоэлектроника. – 1985. – № 5. – С. 3–14.
9. Мельник Ю.А. и др. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю.А.Мельника.- М.: Сов. радио, 1980. – 378 с.
10. Гурлев Д.С. Справочник по фотографии (фотосъемка). – К.: Техніка, 1989. – 320 с.
11. Белинский В.Н., Поздеев С.Т. Авиационная светотехника: Уч. пособие. – К.: КВВАИУ, 1984. – 320 с.
12. Белинский В.Н., Поздеев С.Т. Авиационная оптико-электроника и светотехника: Уч. пособие. – К.: КВВАИУ, 1987. – 316 с.
13. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). – М.: Сов.радио, 1977. – 368 с.
14. Карпович И.Н. Военное дешифрирование аэроснимков: Учебник. – М.: Воениздат, 1990. – 544 с.
15. Мельканович А.Ф. Фотографические средства и их эксплуатация: Учебник. – М.: Воениздат, 1984. – 576 с.
16. Попов М.А. Основы оптико-электроники авиационного оборудования. – К.: КВВАИУ, 1982. – 244 с.
17. Ребрин Ю.К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. – К.: КВАИУ, 1988.–450с.
18. Тепляков Н.А., Михалев Н.П. Щелевые фотоаппараты: в помощь строевым частям. – К.: КВИАВУ ВВС, 1971. – 100 с.

19. Инженерный справочник по космической технике/Под ред. А.В. Солодова. – М.: Воениздат, 1977. – 432 с.
20. Авиационная светотехника / Под ред. И.Н. Белоглазова - М.: ВВИА, 1987. – 319 с.
21. Козелкин В.В., Усольцев И.Ф. Основы инфракрасной техники. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
22. Справочник по приемникам оптического излучения / В.А. Волков, В.К. Вялов и др.; Под ред. Л.З. Криксунова. – К.: Техніка, 1985. – 216 с.
23. Фотоприемники и фотопреобразователи: Сборник научных трудов. – Л.: Наука, 1986. – 296 с.
24. Справочник по приборам инфракрасной техники / Под ред. Л.З. Криксунова. – К.: Техніка, 1980. – 232 с.
25. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / Под ред. Р. Дж. Кисса: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.
26. Приборы с зарядовой связью / Под ред. М. Хоузза: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1981. – 376 с.
27. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. – М.: Сов.радио, 1970. – 496 с.
28. Кононов В.И., Федоровский А.Д., Дубинский Г.П.
29. Оптические системы построения изображений. – К.: Техніка, 1981. – 134 с.
30. Гороховский Ю.Н., Баранова В.П. Свойства черно-белых фотографических пленок. – М.: Наука, 1970. – 388 с.
31. Фото-кино-техника / Под ред. Е.А. Иофиса. – М.: Сов. энциклопедия, 1981. – 448 с.
31. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 928 с.
32. Гудмен Дж. Статистическая оптика / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 527 с.
33. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 198 с.
34. Татарский В.И. Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 176 с.
35. Чернов Л.А. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. – М.: Изд-во АН СССР, 1958.
36. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений. – М.: Мир, 1972. – 230 с.
37. Стоук Дж. Введение в когерентную оптику и голографию / Пер. с англ. – М.: Мир, 1967. – 218 с.

38. Справочные данные по бортовому информационному комплексу «Метеор-3М», технологии приема, обработки и распространения данных дистанционного зондирования / Под. ред. Г.М. Полищука, С.Н. Конюхова. – М.: Росавиакосмос, 1997. – 157 с.
39. Космическая система Сич-1М: Справочные данные по бортовому информационному комплексу, технологии приема, обработки и распространения данных дистанционного зондирования. Выпуск №2 / Под. ред. Г.М. Полищука – М.: Росавиакосмос, 2000. – 81 с.
40. Спутники оптической съемки Земли с высоким разрешением / Под. ред. А.А. Кучейко.-М.: Радиотехника, 1990. – 128 с.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КВР	- космічна видова розвідка	
ЦПОСІ	- центр прийому і обробки спеціальної інформації	
РППОСІ	- регіональний пункт прийому і обробки спеціальної інформації	ін-
АРМ	- автоматизоване робоче місце	
РЛБОСА	- радіолокатор бокового огляду з синтезованою апертурою	
КК	- космічний корабель	
КР	- космічна розвідка	
РЛС	- радіолокаційна станція	
ОЕ	- оптико-електронна	
ІЧ	- інфрачервона	
РЛСБО	- радіолокаційна станція бокового огляду	
ККВР	- комплекс космічної видової розвідки	
НСК	- наземний спеціальний комплекс прийому і обробки розвідінформації	
НАКУ	- наземний автоматизований комплекс управління орбітальним угрупованням	
ТМІ	- телеметрична інформація	
ОКВК	- окремі командно-вимірювальні комплекси	
ЦУП	- центр управління польотом	
СПД	- система передачі даних	
ШРЗ	- ширококутова радіолінія зв'язку	
ППІ	- пункт прийому інформації	
ЦОРІ	- центр обробки розвідувальної інформації	
БЗК	- бортовий забезпечуючий комплекс	
БСК	- бортовий спеціальний комплекс	
ДЗЗ	- дистанційне зондування Землі	
ЕОМ	- електронно-обчислювальна машина	
БПЧП	- бортовий програмно-часовий пристрій	
РК	- разові команди	
БЦОМ	- бортова цифрова обчислювальна машина	
АСУ	- автоматизована система управління	
НПРС	- наземна приймально-реєструюча станція	
ОЦ	- Операторський центр	
ЦОП	- Центр оперативного планування	
СІ	- спеціальна інформація	
РІ	- розвідувальна інформація	
АЦП	- аналогово-цифровий перетворювач	
ЗП	- запам'ятовуючий пристрій	
ОЗП	- оперативний запам'ятовуючий пристрій	
ЦПО	- цифровий процесор обробки	

ЕПР	- ефективна поверхня розсіювання
РЛ	- радіолокаційний
ОС	- оптична система
ПВ	- приймач випромінювання
ФВС	- формувач відеосигналу
МОН	- метал-оксид-напівпровідник
МДН	- метал-діелектрик-напівпровідник
ПЗЗ	- прилад з зарядовим зв'язком
ЧЗН	- часова затримка й накопичення
ПЗІ	- прилад із зарядовою інжекцією
ФСЗ	- формувач сигналів зображення
РППЗ	- розподілений посилювач з плаваючими затворами
ФХО	- фотохімічна обробка
ОЕСВР	- оптико-електронна система видової розвідки
ЕІК	- елементарний інформаційний канал
СВТО	- система валової та тематичної обробки
ШСЗ	- ширококутова радіолінія зв'язку
СПР	- система прийому та реєстрації
СНК	- система нормалізації конвертування
ПТК	- програмно-технічний комплекс
РСУ	- робоча станція управління
ПДС	- приймально - демодулююча система
АПП	- антенно - поворотний пристрій
ЛОМ	- локальна обчислювальна мережа

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- Аберації оптичних систем
сферична 131-133
кома 133-134
астигматизм 134-136
дисторсія 136-137
хроматичні аберації 137-140
- Автокореляційна функція 307
- Автоматизовані робочі місця 367, 369-373
- Багатозональне знімання 254
- Багатозональний космічний фотоапарат МКФ-6М 259-262
- Багатозональний скануючий пристрій МСУ-Е 284-287
- Багатозональний скануючий пристрій МСУ-СМ 274-278
- Багатозональний скануючий пристрій МСУ-8 287-294
- Відбиття 91-95
- Дзеркала 121
- Діафрагма
апертурна 128-129
польова 128-129
віньєтуюча 129
- Експозиція 78
- Заломлення 91-95, 124-126
- Контраст 85-87, 255, 322, 324
- Комплекси космічної видової розвідки 12
- Радіометричні викривлення 349
- Геометричні викривлення 351
- Космічна розвідка 9, 12, 17
- Космічний апарат розвідувального призначення 17-26, 28-34
- Космічні фотоапарати 227-229
кадрові 229-231, 236-239
щілинні 239-244
панорамні 244-248
- Лінза 115-117, 124-127, 298-302
- Метеорологічна дальність видимості 103
- Наземний спеціальний комплекс 333, 336
- Об'єктив 141-153, 325
універсальні 149
світлосильні 149
довгофокусні 150
телеоб'єктиви 150
понадвофокусні 150-152
широко кутові 152-153
- Освітленість 77, 79-82, 141-142, 297, 326-327
- Оптико-електронні системи 263
одноканальна з одноелементним приймачем 263-265
одноканальні з багатоелементним приймачем 265-267
- Оптико-електронні системи видової розвідки 252, 262, 268-274,
- Оптична система 111-114, 312
- Оптичні дефлектори 153-157, 161-163
дзеркальний барабан-піраміда 158-160
дзеркальний барабан-призма 160-161
- Оптичні клини 121-122
- Оптичний сигнал 297
- Панхроматичне знімання 249
- Передаточні характеристики оптичних систем 308
амплітудна характеристика 311
імпульсна функція (функція розсіювання точки) 312-314, 325
функція розсіювання лінії 314, 316-317, 320, 322, 329
перехідна функція (або прикордонна крива) 312, 315-317, 325, 329, 331

частотна передаточна функція 312
оптична передаточна функція 312, 317-318, 323, 325
амплітудно-частотна характеристика 318
функція передачі модуляції 318-322, 324, 329
функція передачі фази 321
частотно-контрастна характеристика 325-328
Плоскопаралельні пластинки 119-121
Поглинання 97, 99-101
Призма 117-119
Приймачі випромінювання 163-173, 197-210
фоторезистори 173-176
фотодіоди 176-179
формувачі відеосигналів 179-197
фотографічні 210-216, 221-227
Просторова частота 303, 326
Програмно-технічний комплекс 367, 369
Пункт прийому та обробки інформації 334, 338-346
Радіолокатор бокового огляду 39-43
радіолокатор бокового огляду з синтезованою апертурою 43-60
Роздільна здатність 143-147, 327
розсіювання 99, 101-103
Світимість 77, 252
Світлофільтри 122-124
Система валової та тематичної обробки 335, 337, 362, 367
Скануючий радіометр 60-64
Спектр Хінчина-Вінера 307
Спектрозональне знімання 254

Станція нормалізації та конвертування 334, 339, 342, 346-348
Тематичні картографи космічних апаратів Landsat 279-283
Тілесний кут 76,
Турбулентність 104, 107-110
Яскравість 78, 82-85, 251, 303, 326
Просвітління оптики 95-97
Фотозатвори 231-232
шторні 233
центральні 233-234
жалозійні 235-236
Фокусуєча властивість лінзи 298-303
Центр обробки розвідувальної інформації 335-336, 338, 443
Ширококутова радіолінія зв'язку 354

ЗМІСТ

Передмова	3
Вступ	4
Розділ 1. Основи побудови комплексу космічної видової розвідки	9
1.1. Загальні принципи побудови комплексу космічної видової розвідки	9
1.1.1. Класифікація видів космічної розвідки	10
1.1.2. Задачі, структура та загальні характеристики комплексу космічної видової розвідки	12
1.2. Загальні принципи побудови космічних апаратів розвідувального призначення	17
1.2.1. Загальні принципи побудови забезпечуючої частини КА розвідувального призначення	18
1.2.2. Типова структура бортового спеціального комплексу КА видової розвідки	22
1.3. Організація взаємодії між елементами ККВР при управлінні КА	27
1.3.1. Організація управління космічними апаратами	28
1.3.2. Основні принципи взаємодії між НСК і НАКУ	34
Розділ 2. Загальні принципи побудови та функціонування радіотехнічних засобів КА видової розвідки	39
2.1. Радіолокатори бокового огляду	39
2.2. Загальні принципи побудови та функціонування радіолокатора бокового огляду з синтезованою апертурою	43
2.3. Загальні принципи попередньої обробки даних радіолокатора бокового огляду із синтезованою апертурою	50
2.3.1. Цифрова обробка сигналів в РЛБОСА	50
2.4. Особливості зображень, що отримані РЛБОСА	63
2.4.1. Класифікація об'єктів радіолокаційного спостере-	

ження	64
2.4.2. Особливості радіолокаційних зображень елементів місцевості та типових об'єктів	64
2.4.3. Системи координат радіолокаційних зображень	71
Розділ 3. Оптико-електронні датчики зображень бортового спеціального комплексу КА видової розвідки	76
3.1. Характеристика об'єктів земної поверхні при природному освітленні	76
3.1.1. Основні відомості з фотометрії	76
3.1.2. Освітленість ландшафту	78
3.1.3. Яскравість ландшафту	82
3.1.4. Поняття контрастності ландшафту	85
3.2. Спектральна класифікація об'єктів	88
3.3. Взаємодія оптичного випромінювання із середовищем	90
3.3.1. Відбиття і заломлення оптичного випромінювання ..	91
3.3.2. Просвітління оптики	95
3.4. Проходження оптичного випромінювання атмосферою	97
3.4.1. Поглинання оптичного випромінювання в середовищі	97
3.4.2. Перепускання атмосферою потоку випромінювання видимого й інфрачервоного діапазонів	100
3.4.3. Вплив турбулентності атмосфери на поширення хвиль	104
3.5. Оптичні системи, елементи і деталі	111
3.5.1. Ідеальна оптична система	112
3.5.2. Оптичні елементи і деталі оптичних систем	114
3.5.3. Заломлення променів тонкою лінзою	124
3.5.4. Створення оптичного зображення	126
3.5.5. Обмеження в оптичних системах	128
3.5.6. Реальні оптичні системи	129
3.5.7. Аберації оптичних систем	130

3.6.	Об'єктиви	141
3.6.1.	Параметри об'єктів	141
3.6.2.	Конструкції об'єктів	148
3.7.	Приймачі оптичного випромінювання	163
3.7.1.	Класифікація приймачів оптичного випромінювання	163
3.7.2.	Параметри приймачів оптичного випромінювання ..	168
3.7.3.	Основні характеристики приймачів оптичного випромінювання	171
3.7.4.	Фотоелектричні приймачі оптичного випромінювання	173
3.7.5.	Формувачі відеосигналів	179
3.8.	Багатозональне знімання	248
3.8.1.	Особливості зображень інфрачервоного діапазону ..	250
3.8.2.	Багатозональні знімки	253
3.9.	Принципи побудови оптико-електронних систем видової розвідки	262
3.9.1.	Класифікація оптико-електронних систем	263
3.9.2.	Параметри і характеристики оптико-електронних інфрачервоних систем	268
3.9.3.	Тематичні картографи космічних апаратів Landsat ..	279
3.9.4.	Багатозональні оптико-електронні скануючі пристрої високого розділення	283
Розділ 4.	Просторово - частотний аналіз оптико-електронних та фотографічних датчиків і систем	297
4.1.	Подання оптичних сигналів	297
4.2.	Фокууюча властивість лінзи	298
4.3.	Поняття просторової частоти та просторового спектра сигналу	303
4.4.	Передаточні характеристики оптичних систем	308
4.5.	Визначення частотно-контрастної характеристики об'єктива за тест-об'єктами	325
4.6.	Визначення ФПМ оптичної систем з використанням рівняння закону Гаусса	329

Розділ 5. Наземний спеціальний комплекс прийому та обробки інформації видової космічної розвідки	333
5.1. Загальні принципи побудови та структура наземного спеціального комплексу прийому та обробки інформації видової космічної розвідки	333
5.1.1. Призначення, склад та структура НСК прийому та обробки інформації видової космічної розвідки	333
5.1.2. Загальні вимоги до засобів НСК	336
5.2. Основні принципи побудови та функціонування ширококутної радіолінії зв'язку "борт - Земля" ...	354
5.3. Основні принципи побудови та функціонування пункту прийому і попередньої обробки	339
5.3.1. Структура та задачі пункту прийому та попередньої обробки інформації	339
5.3.2. Функціонування ППП	343
5.3.3. Принципи побудови системи нормалізації та конвентування даних	346
5.3.4. Зміст операцій нормалізації даних	349
5.4. Принципи побудови систем валової та тематичної обробки зображень	362
5.4.1. Склад операцій валової і тематичної обробки	362
5.4.2. Технологія автоматизованого дешифрування знімків	365
5.4.3. Технічні засоби системі валової та тематичної обробки	367
Список використаної літератури	375
Перелік умовних скорочень	378

**Горшенін Олександр Євгенович
Кондратенко Сергій Олександрович
Дубина Олександр Федорович
Топольницький Павло Петрович**

**ОСНОВИ ПОБУДОВИ КОМПЛЕКСІВ
КОСМІЧНОЇ ВИДОВОЇ РОЗВІДКИ**

Навчальний посібник

редактор **Л.А. Климчук**

Свідоцтво про реєстрацію №877 від 16 липня 2004 року
Підписано до друку 15.02.07. Формат 60×84/16.
Ум. друк. арк. 22,55. Обл. – вид. арк. 19,92. Зам. 151 офс.
Безкоштовно
Друкарня ЖВІРЕ

